

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«___» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

**на тему: «Вимірювання часткових розрядів в діагностиці ізоляції
електрообладнання»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-81мп

Копилець Віктор Русланович _____

Керівник:

Кандидат технічних наук кафедри теоретичної
електротехніки, доцент, Троценко Є. О. _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,
Царьова Т. О. _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
 (спеціалізація «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Копильцю Віктору Руслановичу

1. Тема дисертації «Вимірювання часткових розрядів в діагностиці ізоляції електрообладнання», науковий керівник дисертації Троценко Євгеній Олександрович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «15» листопада 2019 р. №3923-с
2. Термін подання студентом дисертації: 16.12.2019 р.
3. Об'єкт дослідження: часткові розряди в ізоляції електрообладнання.
4. Вихідні дані: імітаційні моделі часткових розрядів при дії змінного та постійного струму.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідження моделі часткових розрядів в ізоляції змінного та постійного струму що запропонована на кафедрі «Теоретичної електротехніки» КПІ ім. Ігоря Сікорського, удосконалити запропоновані моделі, порівняти з існуючими моделями, дослідження використання фільтрів гасіння часткових розрядів.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація на тему магістерської дисертації.
7. Орієнтовний перелік публікацій: 4 публікації.
8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання 9 вересня

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Уточнення завдання на виконання	19.09.2019	
2.	Написання магістерської дисертації	28.11.2019	
3.	Отримання відгуків наукового керівника	07.12.2019	
4.	Попередній внутрішній захист магістерської дисертації на кафедрі	07.12.2019	
5.	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення роботи	11.12.2019	
6.	Отримання зовнішньої рецензії, подання магістерської дисертації на кафедру, допуск до захисту	14.12.2019	
7.	Захист магістерської дисертації	19.12.2019	

Студент

В. Р. Копилець

Науковий керівник дисертації

Є. О. Троценко

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 191, рисунків – 103; таблиць – 36, посилань – 47 та графічну частину на листах формату А4.

У магістерській дисертації було виконано методи вимірювання часткових розрядів в діагностиці ізоляції електрообладнання.

Розглянуто причини виникнення, проблеми утворення часткових розрядів в ізоляції електрообладнання .

В магістерській дисертації проведено приклади вимірювання часткових розрядів за методиками кафедри теоретичної електротехніки.

Розроблено стартап-проект.

Запропоновані моделі можуть бути використані для дослідження якості ізоляційних конструкцій електротехнічного обладнання, а результати дослідження – для компромісного вибору виду напруги за цільових та необхідних умов її передачі.

Ключові слова: постійний струм, постійна напруга, змінна напруга, змінний струм, частковий розряд, ізоляція, електрообладнання, висока напруга, діелектрик.

SUMMARY

The diploma project contains: pages - 191, drawings - 103; tables - 36, links - 47 and graphic part on A4 sheets.

In the master's thesis the methods of measurement of partial discharges in diagnostics of isolation of electrical equipment were performed.

The reasons of occurrence, problems of formation of partial discharges in isolation of electrical equipment are considered.

In the master's thesis examples of partial discharge measurements by methods of the Department of Theoretical Electrical Engineering were conducted.

A startup project has been developed.

The proposed models can be used to study the quality of insulating structures of electrical equipment, and the results of the study - to compromise the choice of voltage under the target and necessary conditions for its transmission.

Keywords: direct current, direct voltage, alternating voltage, alternating current, partial discharge, insulation, electrical equipment, high voltage, dielectric.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,.....	8
СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1.3. Часткові розряди в діагностиці ізоляційних систем електрообладнання високої напруги	15
1.4. Висновки по розділу 1	16
2. ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ	17
2.1. Вимірювання характеристик часткових розрядів: загальна характеристика	17
2.1.1. Загальні положення.....	17
2.1.2. Структурна схема системи вимірювання характеристик часткових розрядів	18
2.1.3. Схеми реєстрації часткових розрядів	18
2.1.4. Вимірювання часткових розрядів в ізоляторах гірлянд високовольтних ЛЕП.....	25
2.1.5. Аналіз результатів вимірювань	29
2.1.6. Висновки по розділу 2.1.	31
2.2. Електричні методи вимірювань часткових розрядів	32
2.3. Способи підвищення чутливості методів вимірювань часткових розрядів	35
2.4. Вимірювання часткових розрядів в умовах експлуатації.....	39
2.5. Акустичні методи контролю часткових розрядів	43
2.6. Індикація часткових розрядів в трансформаторах	48
2.7. Індикація часткових розрядів в електричних апаратах	53
2.8. Обладнання і пристрої для вимірювання часткових розрядів	57
2.9. Огляд сучасних методик аналізу результатів вимірювань часткових розрядів.	60
2.9.1. Кластерний аналіз часткових розрядів.....	68
2.9.2. Метод k-середніх.....	73
2.9.3. Нейронні мережі.....	75
2.9.4. Дерево ухвалення рішень	77
2.10. Висновки по розділу 2.....	79

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ ПРИ ЗМІННОМУ ТА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ	81
3.1. Середовище моделювання	81
3.2. Моделювання часткових розрядів.....	81
3.3 Моделювання систем вимірювання часткових розрядів	84
3.3.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Змінний струм .	84
3.3.2. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Постійний струм	93
3.4. Моделювання гірлянд ізоляторів для ЛЕП змінного струму	104
3.4.1. Моделювання гірлянди 35 кВ	105
3.4.2. Моделювання гірлянди 110 кВ.....	106
3.4.3. Моделювання гірлянди 150 кВ.....	109
3.4.4. Моделювання гірлянди 220 кВ.....	112
3.4.5. Моделювання гірлянди 330 кВ.....	115
3.4.6. Моделювання гірлянди 500 кВ.....	120
3.4.7. Моделювання гірлянди 750 кВ.....	126
3.5. Моделювання гірлянди ізоляторів для ЛЕП постійного струму	132
3.5.1. Моделювання гірлянди ЛЕП постійного струму ± 500 кВ.....	133
3.6. Висновки по розділу 3	140
4. СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	141
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології).....	141
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	144
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	145
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	154
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	157
4.6. Висновки до розділу 4	160
ВИСНОВКИ.....	161
Додаток А	162
Додаток Б.....	165
ДОДАТОК В	169
ДОДАТОК Г	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	183

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

ППС – передача постійного струму

ВПС – вставка постійного струму

ФКП – фільтрокомпенсуючий пристрій

ЧР – частковий розряд

ПРРП – пристрої регулювання реактивної потужності

ЛЕП – лінія електропередачі

АЕ- акустична емісія

АОК - аналіз основних компонентів

t-SNE - методика зменшення рівномірності

U - напруга

C - ємність

K - коефіцієнт приведення

R - опір

t – температура

ВСТУП

Огляд основних способів схемотехнічного моделювання часткових розрядів приведено в [1], [2]. Огляд основних схем вимірювання часткових розрядів приведено в [3]. Детальний аналіз окремих компонентів схем вимірювання часткових розрядів приведено в [4], [5]. Дослідження та схемотехнічне моделювання схеми вимірювання часткових розрядів приведено в [6]. Дослідження часткових розрядів за умови впливу прикладеної напруги різних форм, зокрема вищих гармонік напруги, приведено в [7]. Аналіз та порівняння часткових розрядів, що виникають як при напрузі змінного, так і постійного струму, приведено в [8], [9]. Подальший розвиток трьох-ємнісної схеми заміщення часткових розрядів показаний в [10]. Аналіз публікацій [11], [12] показує, що широкосмугові подільники високої напруги можуть бути використані при вимірюванні часткових розрядів у високовольтній ізоляції різного електрообладнання. Огляд сучасних методів аналізу часткових розрядів із широким залученням інформаційних технологій виконаний в [13]. Все електрообладнання має бути перевірене на часткові розряди в його ізоляції. Це стосується, зокрема і обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН). Так, ОПН з найбільшою тривало допустимою робочою напругою 73 кВ і вище не повинні мати рівень часткових розрядів вище 10 пКл. Тому моделювання ОПН також є актуальною задачею. Огляд основних способів схемотехнічного моделювання ОПН приведено в [14], [15], [16]. Порівняння різних динамічних моделей ОПН проведено в [17]. Спеціальні питання, що стосуються моделювання ОПН або моделювання певних режимів роботи ОПН проведені в [18], [19], [20], [21]. Аналіз впливу індуктивностей з'єднувальних провідників на залишкову напругу ОПН проведено в [22]. Крім відомих негативних впливів, часткові розряди у підвісних ізоляторах можуть бути причиною електричного перекриття гірлянд підвісних ізоляторів [23]. У зв'язку з актуальністю проблеми часткових розрядів, створення пересувних електротехнічних лабораторій для діагностики електрообладнання і у тому числі моніторингу часткових розрядів є перспективним напрямом. При цьому корисним буде досвід розробки як різних

мобільних високовольтних повірочних лабораторій [24], [25], так і досвід розробки окремих їх компонентів [26], [27].

1. УТВОРЕННЯ, РОЗВИТОК І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

1.1. Причини виникнення, характеристики і класифікація часткових розрядів

Частковий розряд (ЧР) - це електричний розряд, який не повністю перемикає простір між двома провідними електродами. Розряд може бути в просторі заповненим газом, у твердому теплоізоляційному матеріалі, в газовому пазирю в рідкому ізоляторі або навколо електрода в газі. Коли частковий розряд відбувається в газі, його зазвичай називають короною. Частковий розряд прийнято вважати основною причиною тривалої деградації та можливої несправності електроізоляції. Як результат, його вимірювання є стандартною процедурою на заводських випробуваннях багатьох типах високовольтного обладнання. Крім того, активність часткового розряду може бути протестована на обладнанні, яке знаходиться в експлуатації щоб запобігти можливому порушенні ізоляції.

Дефекти або порожнини в твердій ізоляції зазвичай заповнюються газом значно нижчої міцності на розрив, ніж навколишній матеріал. На додаток до цього, пропускна здатність газу незмінно нижча, ніж у твердоді ізоляції, через що напруженість електричного поля в порожнині буде вищою, ніж в навколишньому діелектрику. Отже, при нормальній робочій напрузі ізоляції напруга, яка є в порожнині може перевищувати значення пробою і ініціювати електричний пробій або частковий розряд в порожнечі.

Електрична міцність, як правило, передається синусоїдальним змінним струмом. Ізоляція має вплив від різних електричних напруг протягом циклу живлення, з двома піками напруги на цикл. Це створює дуже характерний розподіл активності розряду. Характер розподілу розрядів в циклі живлення є ключовим фактором для розпізнавання ЧР та відмежування його від інших не пов'язаних джерел шуму та визначення самого джерела.

Явище часткового розряду поділяється на два типи.

а) Зовнішній частковий розряд

Зовнішній частковий розряд відбувається назовні силового обладнання. Такий тип розряду відбувається в повітряних лініях, на арматурі тощо.

б) Внутрішній частковий розряд

Частковий розряд, який відбувається всередині системи. Розряд в порожнечі належить до такого типу часткового розряду і необхідний для системи вимірювання ЧР. Явища ЧР включають в себе декілька типів розряду - це поверхневий розряд, порожнинні розряди, коронний розряд, розряд у вигляді дерева.

- **Коронний розряд** - коронний розряд відбувається через нерівномірність електричного поля на гострих краях провідника, що зазнає високої напруги. Ізоляція, що подається для такого типу розрядів являє собою газ або повітря, або рідину.

- **Поверхневий розряд** - поверхневий розряд відбувається на межах розділу діелектричного матеріалу, таких як поверхня розділу газу або твердого тіла, так як він витримує навантаження, яке перевищує тимчасові навантаження на твердий матеріал. Це може відбуватися на осерді або в кінці кабелю, в будь-якій точці на поверхні ізолятора між електродами.

- **Порожнинні розряди.** Порожнини зазвичай утворюються з твердих або рідких ізоляційних матеріалів. Порожнина, як правило, заповнена газом або повітрям. Коли газ в порожнині перебуває під напругою, такі розряди й відбуваються.

- **Канал у вигляді дерева** - Поля високої інтенсивності, які виробляються в ізоляційному матеріалі на його гострих краях і тим самим погіршує ізоляційний матеріал, це й відповідає за виробництво безперервного часткового розряду.

1.2. Проблема утворення і розвитку часткових розрядів

Частковий розряд виникає в порожнинах, які заповнені газом, або через дефекти ізоляції високої напруги. Ці дефекти можуть виникати різними способами:

- **Під час виготовлення** - Тверді ізолятори розроблені для рівномірного розподілу електричної напруги між провідними електродами. Однак на практиці при виробництві можуть виникати дефекти, що спричиняють невеликі порожнини або порожнечі в об'ємі ізоляції.
- **Установка обладнання** - Коли електрообладнання виробляється на заводі або встановлюється на місці, можуть бути допущені помилки, які або пошкоджують, або ж і послаблюють ізоляцію, або які викликають підвищену електричну напруженість по всій ізоляції.
- **Старіння та погіршення** - Більшість ізоляційних матеріалів природним чином погіршуються з віком, коли внутрішні хімічні зв'язки розпадаються. Цей процес робить ізоляцію слабшою і менш довговічною, коли вона витримує електричну напругу, що виникає при нормальних робочих умовах.

Основні види старіння діелектриків – електричне, теплове, механічне, радіаційне.

Електричне старіння відбувається, головним чином, під дією часткових розрядів. В суцільному твердому діелектрику (поліетилені) внаслідок інжекції об'ємного заряду і зростання локального поля спочатку утворюються мікродефекти, далі – макродефекти (дендрити). Часткові розряди в останніх різко прискорюють процес їх проростання. Це закінчується пробоем діелектрика.

Теплове старіння зумовлене процесами окислення і деструкції діелектриків.

Механічне старіння характерне для твердої ізоляції. У ній виникають термомеханічні напруження внаслідок неоднакових температурних коефіцієнтів лінійного теплового розширення її окремих компонентів, наприклад компаунда і слюди, діелектрика і металевих електродів. Їх тривала дія, особливо в умовах

одночасного впливу сильних електричних полів, також приведе до виникнення мікрODEфектів. Подальша еволюція останніх часто є причиною пробою ізоляції.

Процеси старіння ізоляції прискорюються також внаслідок її **гігроскопічного зволоження**. Це характерно для всіх видів негерметизованої твердої ізоляції, яка містить мікрокапіляри, тобто пори завтовшки менше 0,1 мкм.

Електротехнічне обладнання в умовах опромінення γ -променями, нейтронами експлуатується на атомних електростанціях. Під впливом іонізуючого опромінення в діелектрику відбувається утворення хімічноактивних радикалів. При активній дії кисню в такому діелектрику має місце **радіаційно-окисна деструкція**.

- **Перенапруженість в процесі експлуатації** - коротке замикання або імпульс блискавки може викликати на ізоляцію напругу через струм несправності або перенапругу. Хоча такі події зазвичай мають невелику тривалість, підвищена електрична напруженість або нагрівання від поточного перевантаження може завдати постійну шкоду ізоляції.

- **Пошкодження в процесі експлуатації** - Електричне обладнання може бути фізично пошкоджено під час експлуатації через зовнішні фактори. Підземні кабелі особливо сприйнятливі до пошкоджень сторонніх осіб, наприклад, дорожні роботи біля закопаних кабелів або кумулятивний вплив важких транспортних засобів, що проходять над ними.

1.3. Часткові розряди в діагностиці ізоляційних систем електрообладнання високої напруги

Ізолятори є дуже важливою частиною високовольтного обладнання. Існує так багато типів ізоляторів, які використовуються в електромережі високої напруги для захисту енергетичного обладнання, як газу, вакууму, тверда речовина та рідина або їх комбінація. Дуже важливо підтримувати ізолятори в нормальному або здоровому стані під час його роботи. Оскільки ізолятори завжди доступні в нечистому вигляді та слабких місцях, порожнини, тріщини є всередині ізоляторів, і це створить частковий розряд (ЧР), який через час зменшить пропускну здатність ізоляції, і призведе до повного або часткового виходу з ладу або поломки ізоляції. Тому виявлення часткового розряду є дуже важливим завданням для інженерів-електриків для підтримання силового обладнання високої напруги у здоровому та нормальному стані. Моделювання процесу часткового розряду дозволяє краще зрозуміти явища.

Відстеження - це утворення постійного провідного шляху по поверхні ізолятора. Зазвичай шлях провідності є результатом руйнування ізоляції. Відстеження відбувається в сполуках на основі вуглецю.

Установки високої напруги зазвичай дуже важко очищати, тому вони чутливі до бруду та забруднення. За наявності вологи ці забруднюючі шари спричиняють струм витoku по поверхні ізолятора. Це нагріває поверхню і через випаровування викликає розрив плівки вологи. Великі різниці потенціалів утворюються в проміжках у волозій плівці, і невеликі іскри можуть усунути зазори. Нагрівання від іскор викликає карбонізацію ізоляції і призводить до утворення постійних вуглецевих доріжок на поверхні. За таких умов цей процес розвиватиметься з часом і врешті призведе до пробою та повного руйнування ізоляції. Відстеження як явище сильно обмежує використання органічних ізоляторів у зовнішніх умовах. Швидкість відстеження залежить від структури полімерів і може бути значно знижена через додавання до полімеру відповідних наповнювачів, що інгібує карбонізацію.

1.4. Висновки по розділу 1

Короткий опис ЧР був представлений у цьому розділі. Енергетики вважають, що однією з найважливіших проблем енергосистеми високої напруги є поломка ізоляторів або поломка ізоляторів. Моделювання процесу часткового розряду дозволяє краще зрозуміти явища. Характеристики виникнення, розповсюдження та руйнація при частковому розряді із застосуванням змінного струму були отримані та обговорені в атмосферних умовах і під тиском.

Опитування показує, що більшість робіт з ЧР було проведено з урахуванням порожнеч. Дослідження повинні бути розширені, щоб отримати показник достовірності для ЧР з одним та декількома розрядами, і для складних моделей ЧР, що спостерігаються в практичних системах ізоляції

2. ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

2.1. Вимірювання характеристик часткових розрядів: загальна характеристика

2.1.1. Загальні положення

Основна мета вимірювання характеристик ЧР в ізоляції високовольтних конструкцій полягає в отриманні додаткової діагностичної інформації для оцінки її стану. Останнє визначається безліччю характеристик, серед яких одне з головних місць займає комплекс характеристик ЧР.

Вимірювані характеристики ЧР використовуються для:

- розробки нових видів електричної ізоляції і технології її виготовлення;
- створення нових конструкцій високовольтного обладнання або його частин;
- контролю стану ізоляції обладнання, яке виготовляється;
- відстеження стану ізоляції обладнання, що вводиться в експлуатацію, після монтажно-налагоджувальних робіт;
- перевірки стану ізоляції обладнання після ремонтних робіт;
- спостереження за станом ізоляції в період експлуатації обладнання (під робочою напругою).

Вимірювання і розрахунок комплексу характеристик вимагає застосування спеціальних технічних засобів з програмним забезпеченням для обробки результатів вимірювання, використання цих результатів в оцінці технічного стану ізоляції випробуваного обладнання та прогнозування залишкового ресурсу. У зв'язку з цим для вирішення задач діагностування необхідно використовувати новітні технічні засоби, переважно комп'ютерні, що працюють в автоматизованому або автоматичному режимах.

2.1.2. Структурна схема системи вимірювання характеристик часткових розрядів

Системи вимірювання характеристик ЧР (рис. 2.1) складаються з [3]:

- пристрою приєднання (датчик), ПП;
- вимірювач ЧР, ВЧР;
- лінії зв'язку пристрою ПП з вимірювальним приладом (передавальний пристрій), ЛЗ1;
- периферійних пристроїв, П.

В залежності від мети вимірювання ЧР і виду контролю стану ізоляції за характеристиками ЧР вимірювальний прилад і периферійні пристрої розрізняються.

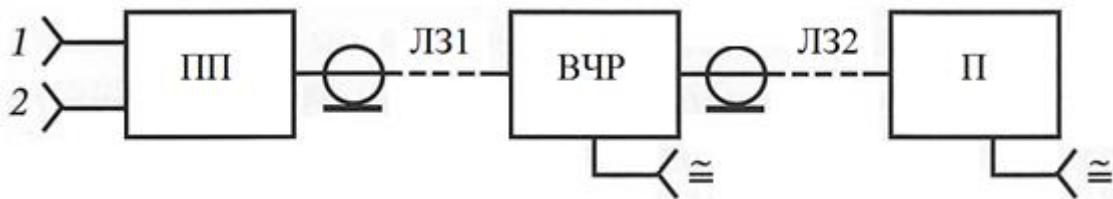


Рис. 2.1. Структурна схема системи вимірювання характеристик ЧР.
1, 2 – клеми входу ПП.

Мета вимірювання ЧР може полягати або в разовому визначенні тільки максимального значення уявного заряду q неодноразово повторюваних ЧР, або групи характеристик ЧР. Крім того, система вимірювання (рис. 2.1) може використовуватися при контролі ізоляції обладнання на заводі-виробнику або діагностичному обстеженні обладнання або бути складовою частиною системи діагностування, що працює в режимі моніторингу під робочою напругою.

2.1.3. Схеми реєстрації часткових розрядів

Схема реєстрації ЧР складається з об'єкта випробування (ОВ), з'єднувального конденсатора C_z (або іншого пристрою, виконуючого роль високовольтного елемента ділянки напруги), підключеного до високовольтного

електрода ОВ, ПП та вимірювача ЧР. За способом підключення ПП до ОВ схеми поділяються на два види (рис. 2.2, а-б).

Схеми реєстрації вибираються виходячи з умов підключення пристрою ПП і потреби відлаштування від сигналів перешкод. Чутливість Г-подібних схем однакова за умови відсутності впливу перешкод і малих значень паразитної ємності [3].

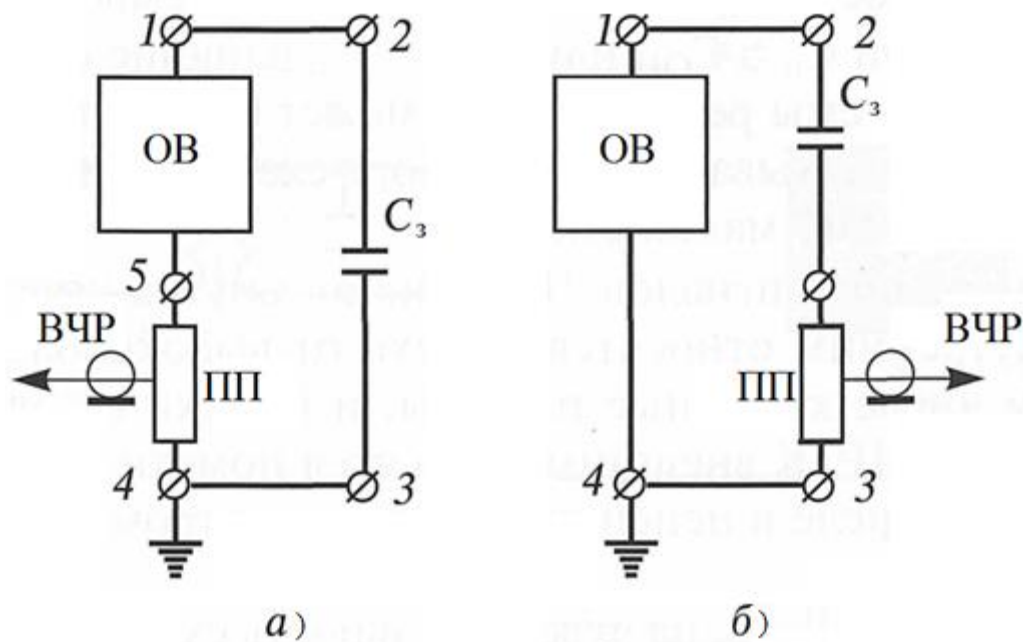


Рис. 2.2. Схеми реєстрації ЧР

Г-подібні схеми реєстрації з включенням пристрою приєднання (а – в коло заземлення ОВ; б) – в коло заземлення конденсатора C_3). 1 – 5 – вузли з'єднання; ОВ – об'єкт випробування; C_3 – з'єднувальний конденсатор; ПП – пристрій приєднання; ВЧР – вимірювач ЧР.

Схема а застосовується в тих випадках, коли низькопотенціальний вивід 5 ОВ може бути відключений від землі.

Розглянемо схеми реєстрації з урахуванням паразитних ємностей C_{π} високовольтних з'єднань відносно землі (рис. 2.3). У випадку $C_{ОВ} \ll C_3 \gg C_{\pi}$

вплив ємності C_{π} на чутливість схеми реєстрації а незначний. При $C_{\pi} \cong C_{ОВ}$ чи $C_{ОВ} < C_{\pi}$ вплив ємності C_{π} на чутливість схеми реєстрації б може бути

суттєвим. Ця обставина враховується при виборі схеми реєстрації ЧР під час випробування ОВ малої ємності [3].

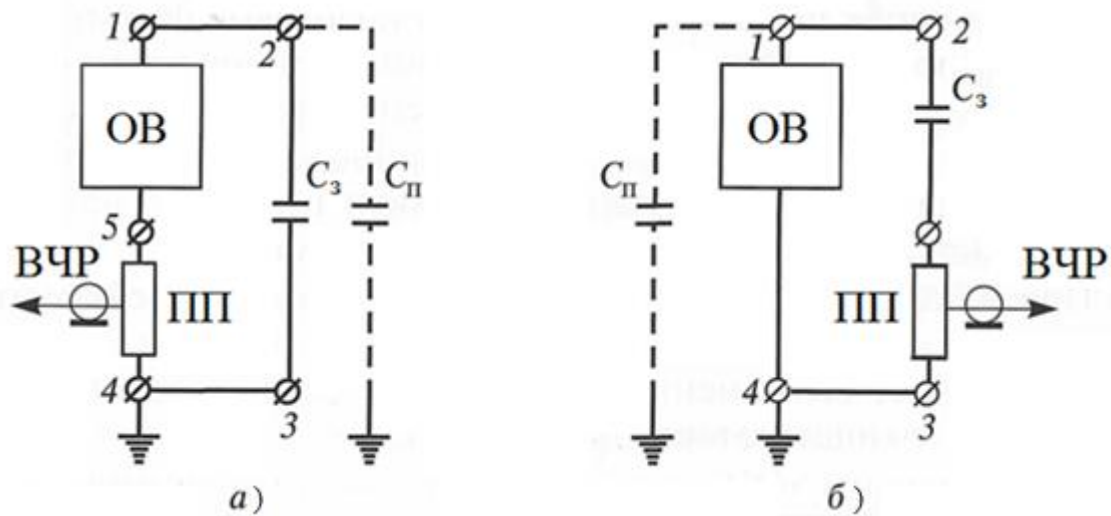


Рис. 2.3. Схеми реєстрації ЧР з паразитними ємностями високовольтних з'єднань.

$C_п$ – паразитна ємність високовольтних з'єднань відносно землі. а-б – Г-подібні схеми при ввімкненні пристрою ПП (а – в коло заземлення ОВ; б – в коло заземлення конденсатора C_3). 1 – 5 – вузли з'єднання.

На результати вимірювання сигналів ЧР впливають внутрішні і зовнішні перешкоди. До внутрішніх відносяться перешкоди від високовольтних з'єднань, у тому числі коронні розряди, і перешкоди від елементів системи вимірювання ЧР. До зовнішніх відносяться перешкоди від джерел живлення, в тому числі і ланцюгів живлення, і електромагнітні високочастотні перешкоди.

Для усунення перешкод від високовольтних з'єднань у вигляді коронних розрядів застосовуються спеціальні конструкції, що виключають гострі кромки і забезпечують мінімально можливу напруженість поля на самих з'єднаннях і на металевих частинах випробувальної установки, розташованих поблизу від високовольтних з'єднань. Важливим моментом виключення або зниження перешкод є правильний вибір точки або вузла схеми для заземлення. Аналіз повної схеми реєстрації ЧР дозволяє визначити мінімальне (або єдине) число заземлення з метою виключення паразитних контурів.

Для усунення або зниження рівня перешкод від джерел живлення і ланцюгів живлення застосовуються смугові фільтри 50 Гц (у разі використання напруги промислової частоти), а для джерел при випробуванні прикладеною напругою використовуються захисні опори R_z від 10 до 100 кОм в залежності від ємності C_{OV} . Іноді замість опору R_z застосовують LC - фільтр для відлаштування від вищих гармонік [3].

Основним принципом побудови схем реєстрації ЧР в електроенергетичному обладнанні є необхідність використання наявних в конструкції ОВ вузлів, що забезпечують електричний зв'язок з високопотенційними частинами.

Осцилограми високочастотних сигналів розгорнуті у часі розглянуті в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки:

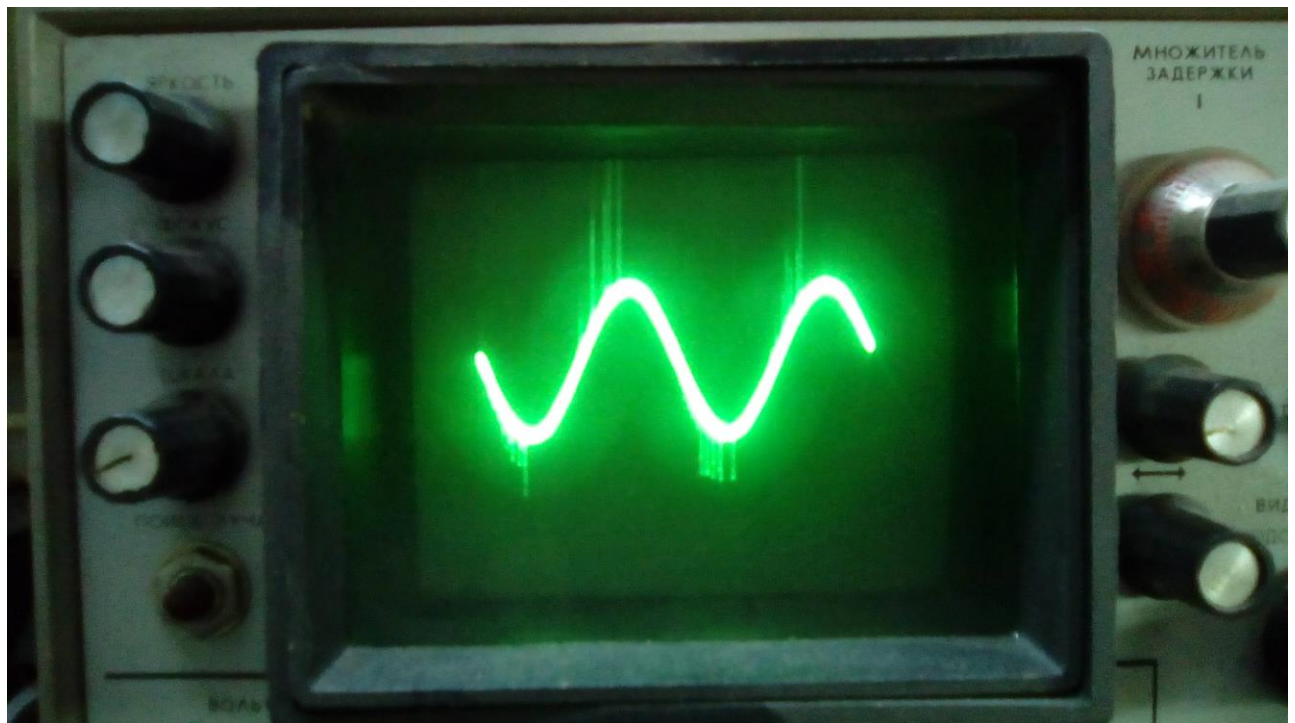
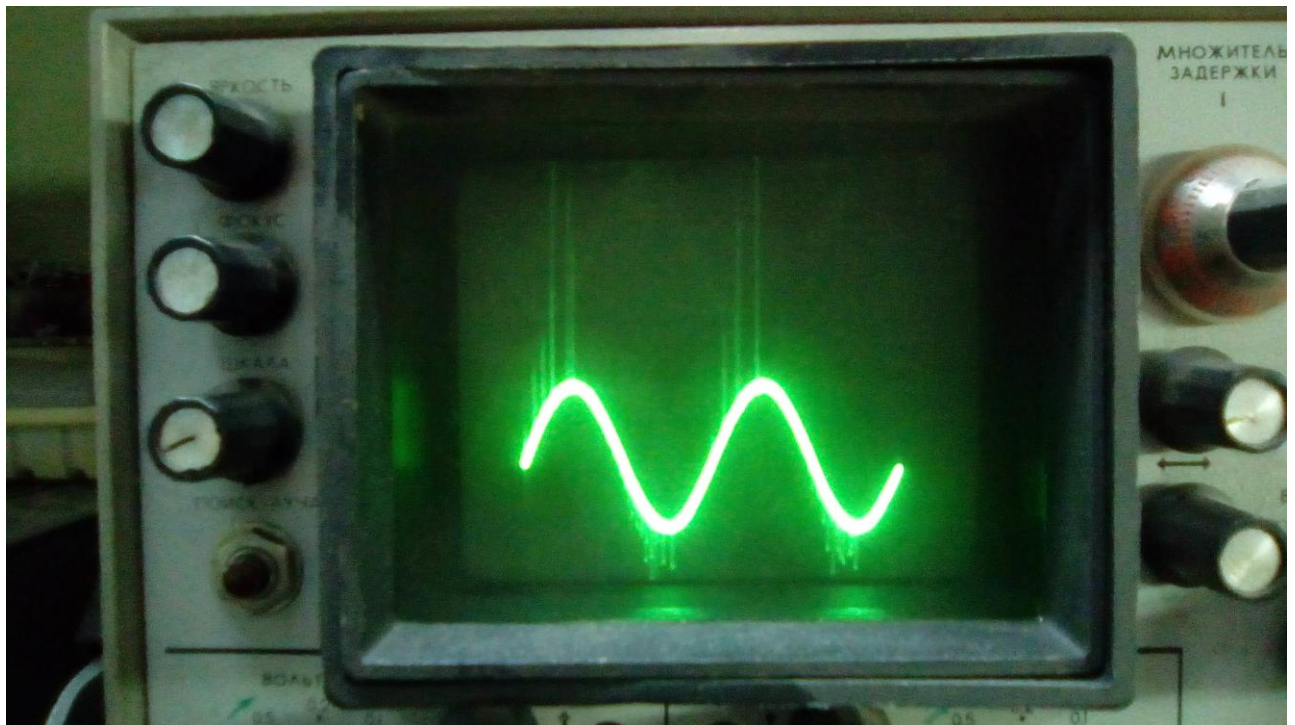


Рис. 2.4. Вигляд ЧР на осцилографі в лабораторії кафедри теоретичної електротехніки

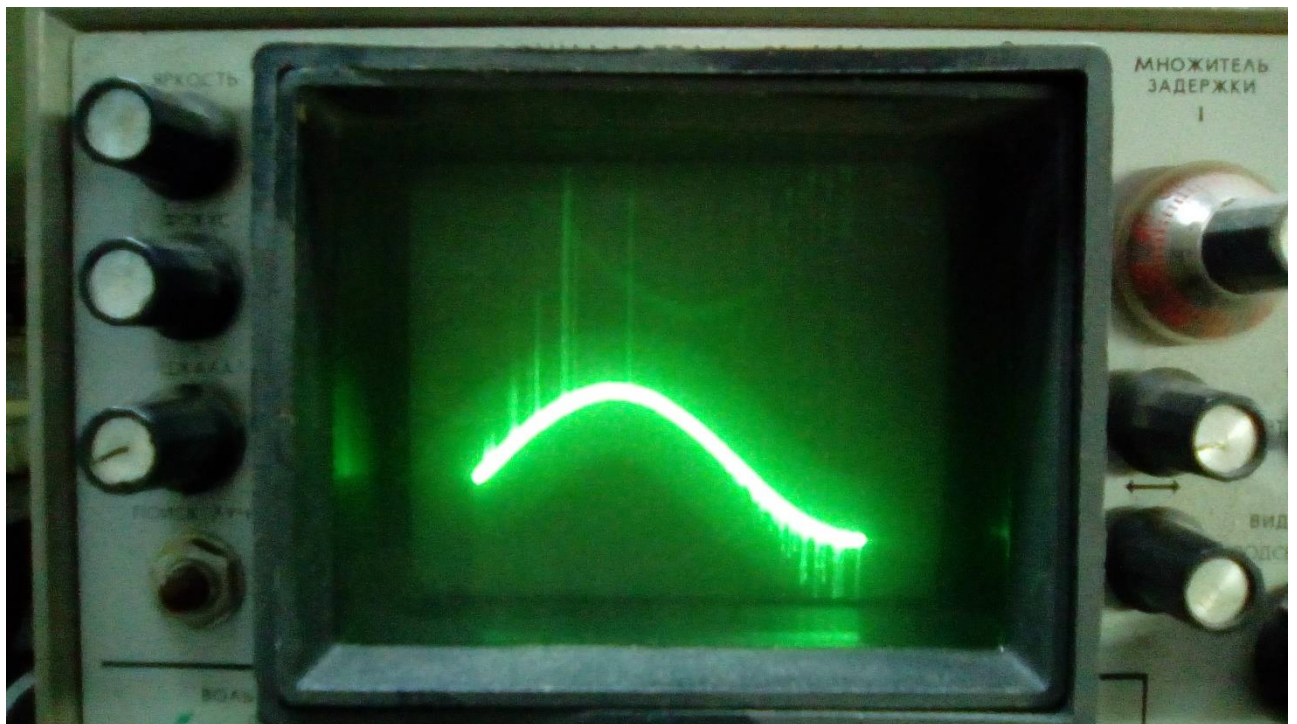
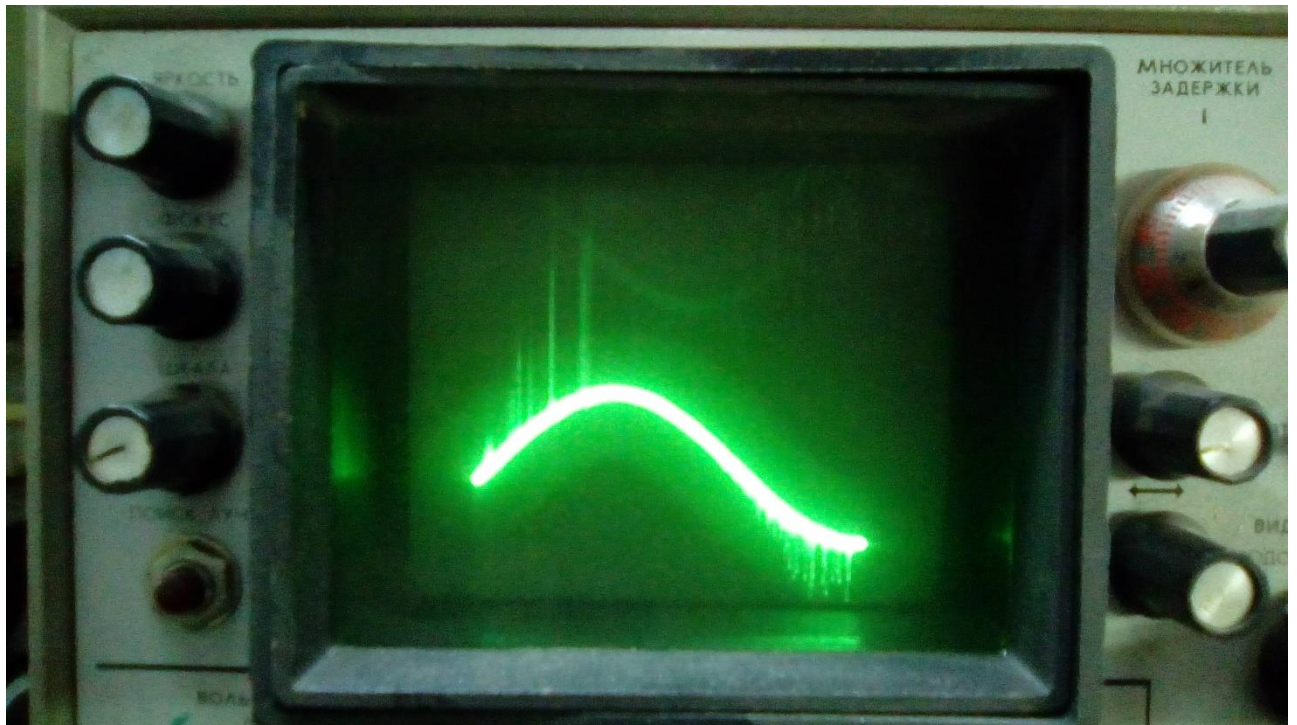


Рис. 2.5. Вигляд ЧР протягом одного періоду в лабораторії кафедри теоретичної електротехніки

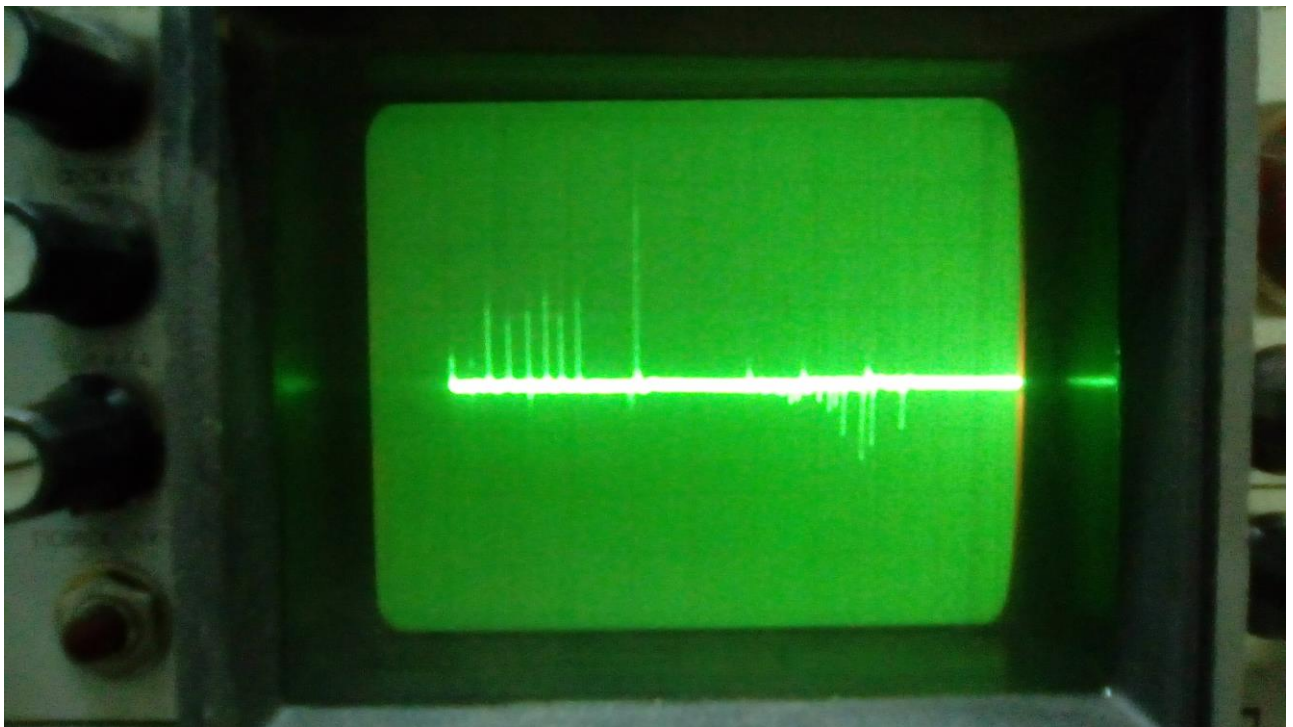
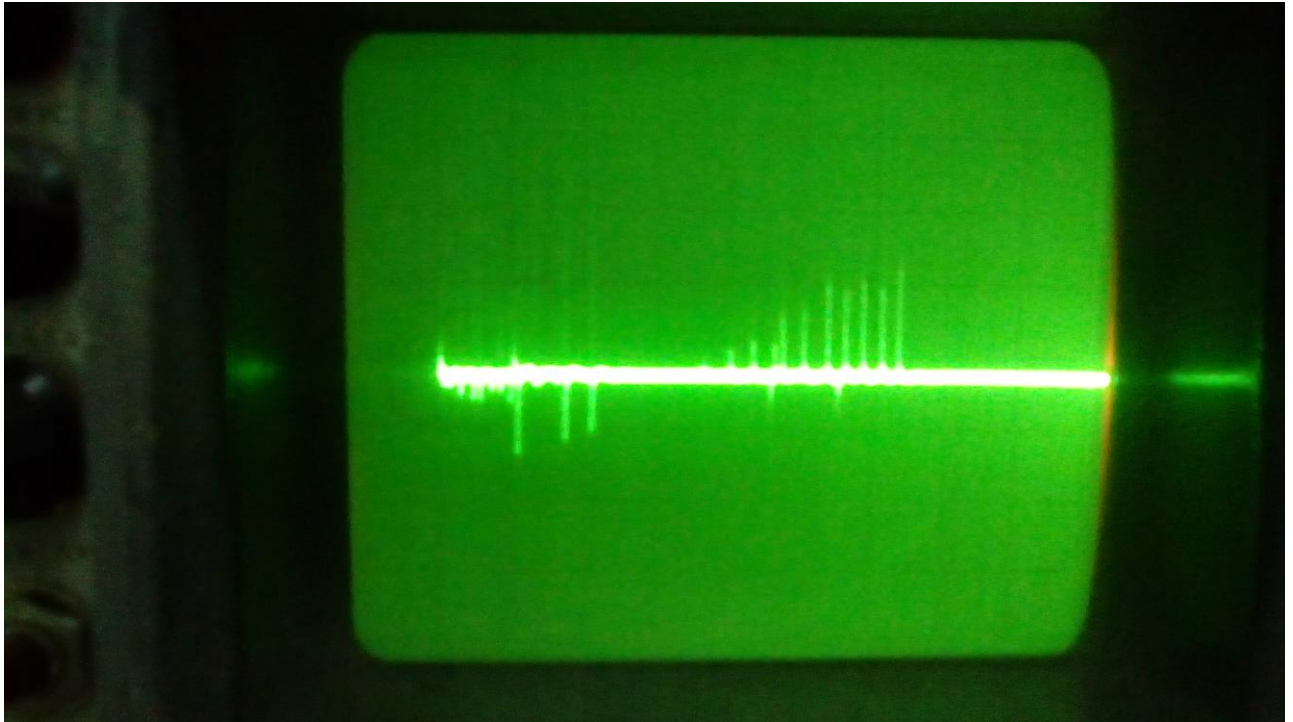


Рис. 2.6. Вигляд ЧР після фільтру в лабораторії кафедри теоретичної електротехніки

2.1.4. Вимірювання часткових розрядів в ізоляторах гірлянд високовольтних ЛЕП

У твердій ізоляції, наприклад у ізоляторах високовольтних ЛЕП, під час виготовлення та експлуатації можуть виникнути газові включення, тріщини, повітряні порожнини (рис. 2.7). Оскільки діелектрична проникність повітря в кілька разів нижче, ніж у твердих діелектриків, напруженість поля в газовому середовищі може значно перевищувати середню напруженість поля в основній твердої ізоляції при додатку до ізолятора робочого або випробувальної напруги. Більш низька електрична міцність газового середовища в порівнянні з твердою ізоляцією полегшує процес виникнення іонізації та часткових розрядів [4].

Наявність ЧР в окремих ізоляторах гірлянд ЛЕП призводить до порушень розподілу напруги по всіх довжині гірлянди. Нормальний розподіл напруги і схему заміщення гірлянди показано на рис. 2.8, яку надалі буде розглянуто використано в наступному розділі.

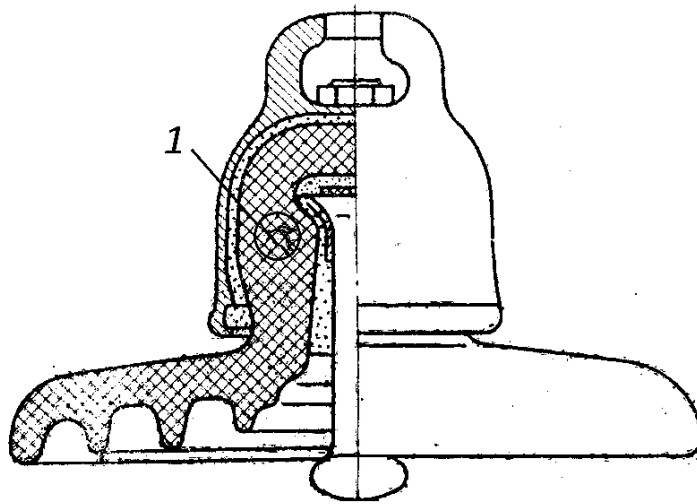


Рис. 2.7. Підвісний ізолятор високої напруги з повітряною порожниною (1).

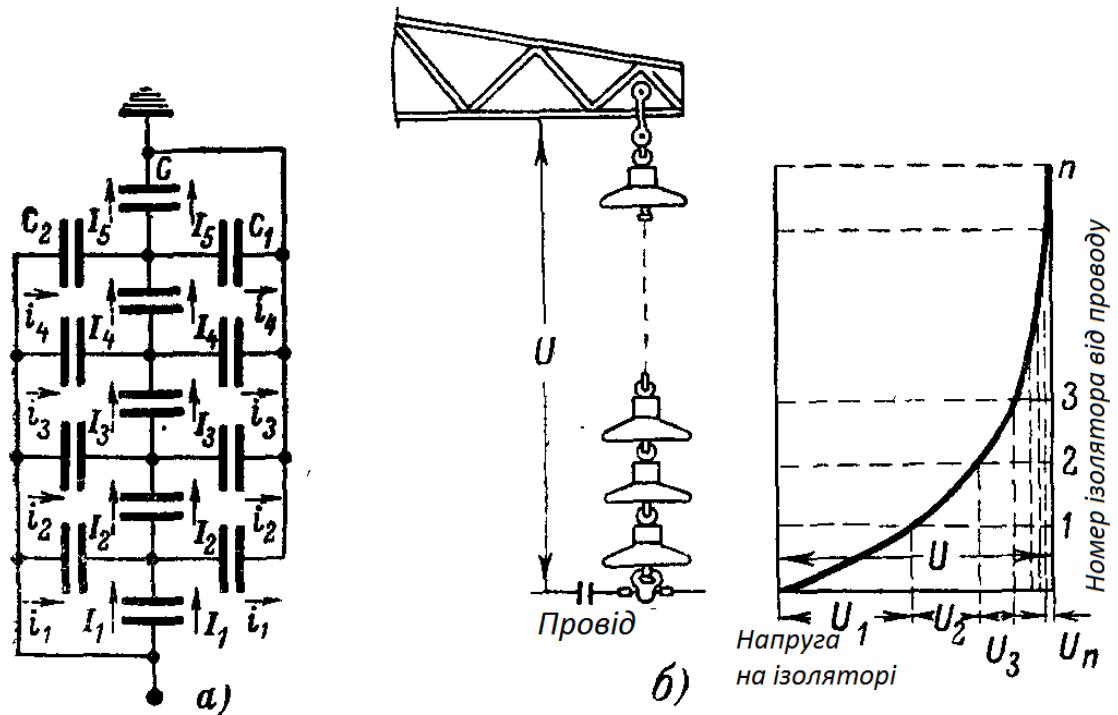


Рис. 2.8. Розподіл напруги по ізоляторам лінійної гірлянди.
а — ємнісна схема заміщення гірлянди ізоляторів; б — розподіл напруги.

Процес виникнення часткових розрядів при прикладенні змінної напруги можна простежити на схемі моделі ділянки ізоляції з повітряною порожниною (рис. 2.6, а). На рис. 2.6, б показані високочастотні розрядні напруги на ємності газового включення при наявності розряду і синусоїдальна напруга без нього.

У нормальному режимі, тобто за відсутності пробоя іскрового проміжку *III* (частковий розряд в порожнині не утворюється), напруга джерела U_i розподіляється обернено пропорційно до ємностей C_1 і C_2 , де C_1 — ємність газового включення, а C_2 — ємність шару справної ізоляції, розташованого послідовно з газовим включенням (рис. 2.9, а). Напруга на ємності C_1 газового включення має в цьому випадку синусоїдальний характер, як і напруга джерела (рис. 2.9, б).

Якщо ж пробивна напруга іскрового проміжку *III* рівна $U_{пр}$, в газовому включенні утворюється розряд, а крива напруги на ємності C_1 набуде вигляду, зображеного на рис. 2.6, б (крива 2) Причиною такої стрибкоподібної зміни

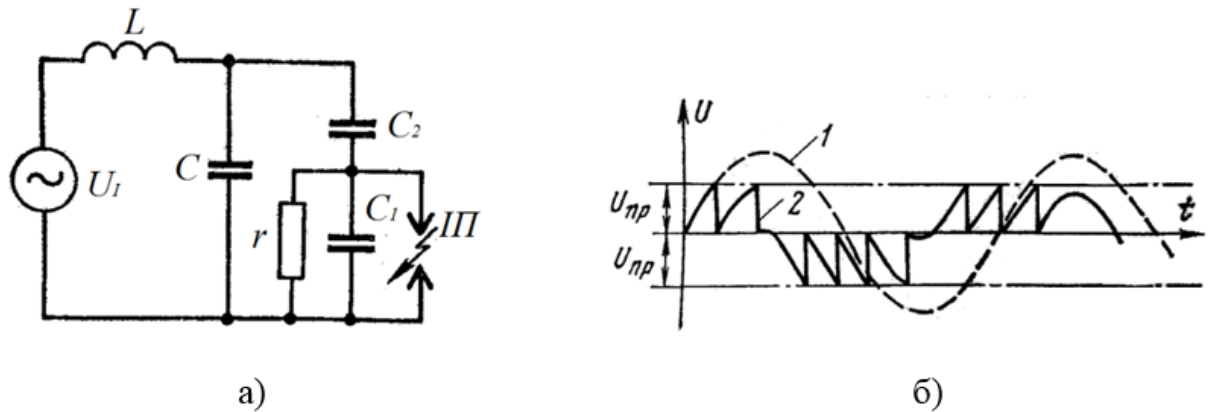


Рис. 2.9. Схема заміщення ділянки ізоляції з повітряною порожниною (а), напруга на ємності C_1 повітряної порожнини. 1 – до пробією іскрового проміжку ІІІ; 2 – при наявності пробією іскрового проміжку ІІІ.

Напруги на ємності порожнини є та обставина, що виникаючий при пробії ІІІ розряд носить характер іскри, не переходить в дуговий розряд і не може довго існувати внаслідок малих значень струму, обумовлених малим значенням ємності C_2 . Після гасіння іскри напруга на порожнині відновлюється, поки не відбудеться нового пробією, гасіння іскри і т. д.

Високочастотна пульсація напруги на ємності C_1 супроводжується короткочасними (близько $10^{-7} - 10^{-3}$ с) сплесками струму в іскровому проміжку, створює електромагнітні коливання високої частоти. Одночасно виникають стрибкоподібні зміни напруги на ємності C (ємності основної маси діелектрика) і струму в зовнішньому ланцюзі. Отже, методами виявлення іонізаційних процесів або часткових розрядів в газових включеннях ізоляції є:

- вимір можливих пульсацій напруги на вимірюваному об'єкті;
- вимір струму (сплесків) у зовнішній ланцюга;
- вимір інтенсивності електромагнітних хвиль, випромінюваних

безпосередньо частковими розрядами [4].

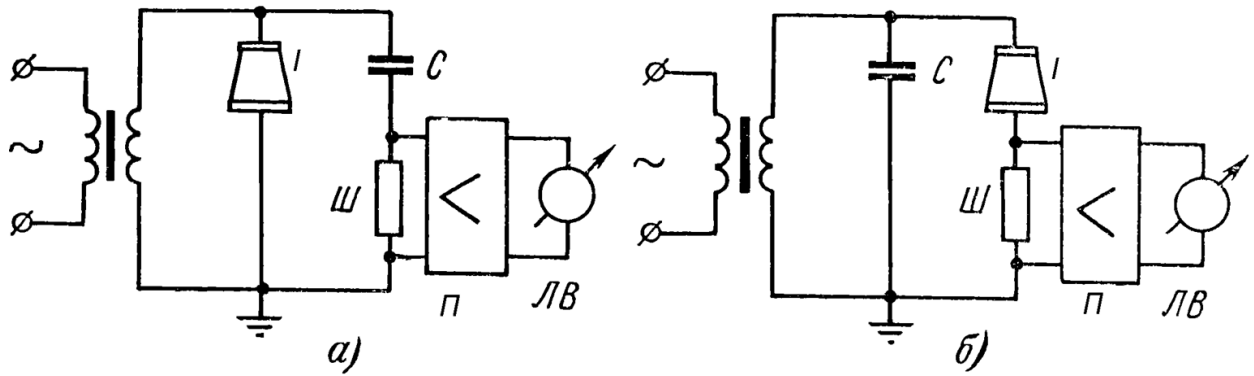


Рис. 2.10. Принципові схеми включення індикаторів часткових розрядів.
 а – схема паралельного включення ІЧР; б – схема послідовного включення ІЧР;
 І – ізолятор; С – конденсатор високої напруги; Ш - шунт; П – підсилювач; ЛВ –
 ламповий вольтметр або електронний осцилограф.

Зміна напруги і струму в зовнішньому ланцюзі випробуваного об'єкта при наявності в повітряних включеннях його діелектрика навіть досить інтенсивних часткових розрядів невеликі, на рівні 1% прикладеної напруги, тому використання перших двох названих методів пов'язане з певними труднощами. Можливості ефективного використання третього методу значно більші.

Для виявлення часткових розрядів методом контролю напруги і струму в зовнішньому ланцюзі вимірювальні прилади включаються безпосередньо в випробувальну схему відповідно паралельно або послідовно з випробуваним об'єктом (рис. 2.10) і називаються зазвичай індикаторами часткових розрядів (ІЧР).

Метод реєстрації часткових розрядів застосовується в основному для виявлення зосереджених дефектів, таких, як розшарування ізоляції, газові включення, тріщини, що утворилися в діелектрику.

До переваг методу відноситься можливість виявлення дефекту на початковій стадії його виникнення, коли виявити його іншими методами неможливо або досить важко (зокрема, опір ізоляції діелектрика і розподіл напруги знаходяться в допустимих межах, і ізолятор витримує випробувальну напругу). Іншою важливою перевагою методу є можливість його використання під робочою напругою електроустановки без відключення обладнання і без підйому на конструкцію у випадку профілактики лінійної ізоляції.

Однак метод реєстрації часткових розрядів має органічними недоліками, до яких в першу чергу відносяться труднощі інтерпретації результатів вимірювань і вплив на вимірювальну апаратуру різних зовнішніх електромагнітних полів. Крім того, застосування цього методу вимагає одночасного застосування інших методів виявлення дефектних ізоляторів [4].

Для виявлення дефектних ізоляторів в гірлянді (рис. 2.5), що створюють сильні радіоперешкоди, використовують дефектоскоп, закріплений на кінці ізолюючої штанги. Запропоновано спосіб почергового шунтування ізоляторів в гірлянді, поки не припиняться радіоперешкоди, які підлягають контролю за високочастотного дефектоскопії. Останній спосіб найбільш доступний, але не дозволяє виявити ізолятори, що створюють радіоперешкоди, коли в гірлянді їх виявляється більше одного.

Описані фактори і високий рівень перешкод ускладнюють задачу встановлення бракувальних норм.

Основним джерелом перешкод являється коронний розряд на проводах, арматурі і обладнанні, контактні з'єднання проводів, які іскрять, арматури і заземлень, електроустановок високої напруги, природа цих розрядів подібна до природи часткового розряду і випромінювання від яких важко відрізнити від випромінювання часткових розрядів від дефектних ізоляторів, що мають тріщини.

2.1.5. Аналіз результатів вимірювань

Найбільш складною проблемою, що виникає при експлуатаційному контролі обладнання, є ідентифікація явища, яке було зареєстровано: ЧР в ізоляції об'єкта або перешкоди. Складність визначається тим, що підлягають виявленню розряди за інтенсивністю близькі до зазвичай наявного рівня перешкод, причому обидва явища мають практично однакові зовнішні прояви.

Всі різноманітні явища, з якими можна зустрітися при експлуатаційних вимірах ЧР, описати неможливо. Вихідні положення для аналізу можна сформулювати наступним чином:

- явища, що відбуваються однаково на всіх трьох фазах, слід віднести до зовнішніх перешкод;
- до перешкод відносяться рідкісні неперіодичні імпульси і імпульси, що йдуть несинхронно з напругою мережі;
- безперервна послідовність імпульсів з незмінною амплітудою і частотою проходження 50 або 100 імпульсів в секунду - є наслідок пробою іскрового проміжку між двома електродами. Як правило, джерела таких розрядів знаходяться поза ізоляції об'єкта (їх треба виявити), але не виключена можливість знаходження їх в об'єкті контролю [5];
- часткові розряди в ізоляції можуть проявлятися як послідовність імпульсів з досить стабільною амплітудою і частотою прямування, кратній промислової (іноді з дуже великою кількістю імпульсів), або як серія нестабільних імпульсів різних амплітуд. в останньому випадку можливі дуже високі інтенсивності (поверхневий розряд, до пробійні явища).

Велику допомогу при аналізі може надати спостереження за допомогою осцилографа. Осцилограф повинен бути синхронізований з мережею, а довжина осцилограми (розгортка) зроблена рівній одному періоду. На такій осцилограмі можна чітко бачити три сплески перешкод від корони і наявність розрядів. Оцінюються амплітуда і фаза (момент) їх виникнення [5].

При аналізі результатів вимірювань необхідно враховувати ступінь забруднення ізоляції і вологість повітря під час контролю. У зонах забруднень рівень перешкод може бути високим через інтенсивність поверхневих розрядів з ізоляції, особливо при підвищеній вологості.

Слід врахувати, що джерелами високого рівня перешкод можуть бути система збудження генератора і деякі технологічні установки споживачів.

Крім пошкодженої ізоляції джерелами розрядів в обладнанні можуть бути деякі дефекти, викликані поганим монтажем або порушеннями контактів в струмоведучих частинах. Так, наприклад, інтенсивні розряди можуть бути на незаземлених виводах ПВН або виводах для вимірювання $tg\delta$ вводів масляних вимикачів і силових трансформаторів. При обриві виводів секцій конденсаторів зв'язку розряд може виникати в утворених таким чином іскрових проміжках.

Інтенсивні розряди можуть бути в ослаблених контактних з'єднаннях струмоведучих частин і заземлень, в поганих контактних роз'ємах (вимикачів, роз'єднувачів, перемикачів трансформаторів).

Перераховані дефекти і аналогічні їм становлять небезпеку для експлуатації обладнання і повинні виявлятися та усуватися поряд з дефектами ізоляції. Тому при аналізі причин виявлених розрядів, які за своїм характером не можуть бути віднесені до розрядів в ізоляції, необхідно враховувати можливість перерахованих вище і аналогічних їм дефектів.

2.1.6. Висновки по розділу 2.1.

Основна мета вимірювання характеристик часткових розрядів в ізоляції високовольтних конструкцій полягає в отриманні додаткової діагностичної інформації для оцінки її стану. Системи вимірювання можуть використовуватися при контролі ізоляції обладнання на заводі-виробнику або діагностичному обстеженні обладнання або бути складовою частиною системи діагностування, що працює в режимі моніторингу під робочою напругою. Схеми реєстрації вибираються виходячи з умов підключення датчиків і потреби відлаштування від сигналів перешкод.

2.2. Електричні методи вимірювань часткових розрядів

Високовольтна ізоляція різноманітного електроустаткування енергосистем протягом усього терміну служби повинна витримувати не тільки робочу напругу, але також і грозові та комутаційні перенапруги, які часто виникають в системах, незважаючи на використання захисних пристроїв. Потрібно враховувати і безупинне старіння ізоляції, тобто зниження її електричної міцності за рахунок висихання або зволоження, забруднення, зміни хімічного складу під дією іонізації, корони, сонячного світла, вібрації, механічних навантажень і т.д. Вказані фактори призводять до зниження електричної міцності зовнішньої ізоляції.

У зв'язку з цим нове енергетичне обладнання, або те, що пройшло ремонт, повинно мати ізоляцію з певним запасом міцності. Наявність цього запасу перевіряють шляхом прикладення до ізоляції напруги, що перевищує номінальну і називається випробною.

Стійкість ізоляції до впливу робочої напруги та до перенапруг резонансного характеру (дуговим, гармонійним, ферорезонансним та ін.) перевіряється шляхом прикладання високої напруги промислової частоти. Необхідно розрізняти наступні терміни (у відповідності до ГОСТ 1516.2- 97):

- **випробна напруга** - напруга заданої форми та довжини, яка прикладається до ізоляції для визначення її характеристик (фактичне значення визначається із нормованої випробної напруги збільшеної (зменшеної) на відповідний коефіцієнт впливу атмосферних умов випробування);
- **нормована випробна напруга** - випробна напруга нормована по значенню (наведена у таблицях ГОСТ 1516.3-96 для нормальних атмосферних умов);
- **розрядна напруга** - випробна напруга, яка визиває повний розряд (вимірюється при випробуваннях);
- **витримувана (фактична) напруга** — найбільше значення випробної напруги, яку витримує ізоляція з заданою вірогідністю (розрахунковий параметр);

50% розрядна напруга - випробна напруга, яка визиває перекриття ізоляції з вірогідністю 0,5;

- повний розряд - електричний розряд, повністю шунтуючий ізоляцію між електродами що спричиняє зниження значення напруги між електродами практично до нуля;
- перекриття - повний розряд у газовому або рідкому діелектрику вздовж поверхні твердого діелектрика;
- пробій - повний розряд у твердому діелектрику.

Рівні деяких, перерахованих вище, нормованих випробних напруг для ізоляторів у відповідності до ГОСТ 1516.3-96 та наведені у табл.2.1.

Таблиця 2.1. Нормовані випробні напруги за ГОСТ 1516.3-96 для ізоляторів, розроблених без вимог перевірки на відсутність часткових розрядів

Клас напруги, кВ	Найбільша робоча напруга $U_{н.р.}$, кВ	Випробна напруга при плавному підніманні (діюче значення)	
		в сухому стані	під дощем,
3	3,6	24	10
6	7,2	32	20
10	12,0	42	28
15	17,5	45	38
20	24,0	65	50
24	26,5	75	60
27	30,0	80	65
35	40,5	95	80

Нижче розглядаються питання, пов'язані з проведенням випробувань ізоляції напругою промислової частоти.

При випробуваннях електроустаткування фактична міцність ізоляції не визначається, тому що при цьому ізоляція була б пробита а апарат виведений з ладу. Відповідно до норм, у тому числі і до ГОСТ 1516.2-97, ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо при прикладенні до неї нормованої напруги амплітудою що визначена ГОСТ 1516.3-96, не спостерігається повних розрядів або ушкоджень, характерними ознаками яких є:

- зміна показань приладів (осцилографа, амперметра, вольтметра);
- звук розряду в бакові;

- вихід диму і бульбашок з масла;
- потріскування;
- істотна різниця між значеннями i (або) між кривими залежності $tg\delta$ від напруги, визначених до і після випробувань, та ін.

Комплекс ознак неприпустимого пошкодження ізоляції встановлюється в стандартах на відповідні види електроустаткування. У цілому можна відзначити, що більшістю стандартів допускаються одиничні часткові розряди в маслі, якщо вони не викликають зміни режиму установки, не відбиваються на показаннях приладів і за час випробувань не викликають ушкодження випробовуваної ізоляції.

При випробуваннях змінною напругою дуже важливим є питання про швидкість підйому напруги до випробної, тривалості витримки після досягнення встановленого рівня і швидкості наступного її зниження. Вимоги до цих режимів різні для окремих видів електроустаткування. За ГОСТ 1516.2-97 швидкість підйому напруги до $1/3$ випробної може бути любою (у тому числі поштовхом), а подальше підвищення повинне бути плавним і швидким, але таким, щоб була можливість робити відлік показань приладів. Рекомендована швидкість підйому напруги приблизно 2% нормованого значення в секунду. Після витримки ізоляції на протязі встановленого часу під напругою (або без витримки), напруга повинна плавно бути зменшена до нуля, або до $1/3$ випробної, а потім може бути відключена.

Такий спосіб проведення випробувань використовують також для визначення розрядної (пробивної) напруги.

Витримка випробної напруги для більшості видів електроустаткування встановлена рівною 1 хв., а для штанг і апаратів з ізоляцією з органічних твердих матеріалів (крім паперово-масляної та кабельної) - 5 хв. Крім того, ізоляція випробується також більш високою напругою без витримки на встановленому рівні. Напруга прикладається три рази з інтервалом на менше однієї хвилини.

Випробування ізоляції високою напругою в експлуатації проводиться тільки для електроустаткування до 35 кВ (включно) через відсутність відповідних пересувних установок.

2.3. Способи підвищення чутливості методів вимірювань часткових розрядів

Часткові розряди (ЧР) в основній ізоляції в багатьох випадках є первопричиною зміни технічного стану апаратів. Тому, було б логічно контролювати інтенсивність, рівень і сумарну потужність часткових розрядів. Однак, використання цього параметра в умовах експлуатації утруднене із-за високого рівня експлуатаційних завад (коронні розряди, ВЧ-зв'язок, комутаційні перенапруги та інші) тому ряд дослідників вважають за недоцільне використання цього параметру в умовах діючих електроустановок, в той же час ряд дослідників описують методи діагностики на основі вимірювання характеристик часткових розрядів в основній ізоляції апаратів. ЧР мають, як правило, велику інтенсивність тому створення вимірювальних пристроїв з необхідною чутливістю не викликає труднощів. Однак, можливість виявлення дефектів в ізоляції, методом реєстрації ЧР в експлуатації визначається не чутливістю апаратури, а здатністю фільтрації зовнішніх перешкод, тобто з усуненням перешкод або зниженням їх рівня. Перешкоди при вимірі ЧР можуть викликатися якими процесами в мережі, пов'язаними з різкими змінами струму, а також джерелами високочастотних напруг. При вимірах часткових розрядів в умовах експлуатації джерела перешкод, як правило, не можуть бути усунені. Додаткові перешкоди можуть створювати радіопередавачі, ЧР в сусідньому обладнанні, розряди між шинами, розряди між елементами струмопроводів, розряди на загострених кряях арматури або на кінцях ножів відключених роз'єднувачів та ін.. Основним джерелом непереборних завад при вимірах в експлуатаційних умовах є коронні розряди на проводах, арматурі і устаткуванні (так званий основний рівень перешкод), які мають характеристики схожі з характеристиками ЧР при реєстрації електричними методами. Вібрація обладнання створює перешкоди при реєстрації акустичними методами. Тому, основною проблемою при вимірюванні в умовах експлуатації є селекція часткових розрядів. Фільтрація перешкод виробляється на кількох стадіях, починаючи з вибору частотного діапазону апаратури, що реєструє, аналізу амплітудно-фазових діаграм (АФД)

сигналів і їх тимчасових залежностей і закінчуючи зіставленням сигналів різних каналів (електричних, акустичних і електромагнітних).

Фільтрація перешкод по частотному діапазону – це правильний вибір частотного діапазону. Частотний діапазон визначається виходячи з міркувань максимального фільтрування завад при досить гарній реєстрації сигналів ЧР від дефектів ізоляції. Основними елементами вимірювача уявного заряду є: підсилювач, вимірювальний перетворювач (типу амплітудного імпульсного вольтметра) і відліковий пристрій. Відповідно до ГОСТ 20074-83 рекомендується застосування широкосмугового підсилювача з наступними характеристиками: нижня частота смуги пропускання - не більше 30 кГц; верхня - не більше 2 МГц. Застосування вузькосмугового підсилювача допускається при великих значеннях ємності об'єкта випробувань, а також при наявності зовнішніх перешкод визначеної частоти. Рекомендується застосовувати вузькосмуговий підсилювач з наступними характеристиками: ширина смуги пропускання - 8-10 кГц; частота настройки - (20 кГц - 2 МГц). Але практика показує, що використання таких частотних діапазонів в умовах експлуатації неможливе із-за великого рівня перешкод в цих діапазонах. Останнім часом на ринку з'являється обладнання, що дозволяє працювати в більш високому діапазоні частот. Оскільки верхня гранична частота сигналів ЧР від дефектів в паперово-масляної ізоляції досягає сотень мегагерц (в елегазі - до декількох гігагерц), а більша частина сигналів перешкод має частотний діапазон нижче за 10 МГц, має сенс мати датчики з широкою входньою смугою частот, нижня межа якої перевищує 10 МГц. Сьогодні при реєстрації ЧР використовуються прилади з частотним діапазоном, що досягає 2,5 ГГц, однак, за наявними даними сигнали з частотами понад 100 МГц сильно послаблюються всередині самого обладнання (крім КРУЕ, що мають коаксіальну структуру) . Тому, з точки зору захисту від зовнішніх завад, найбільш кращим діапазоном для вимірювання електричних сигналів ЧР всередині силового обладнання в умовах експлуатації представляється частотний діапазон 8-30 МГц.

Для виділення імпульсів ЧР з імпульсних сигналів перешкод можуть використовуватися методи аналізу амплітудних спектрів ЧР, метод фазових

діаграм. Перевагою методу амплітудних спектрів є можливість виявлення дефектів, не виділяючи сигналів ЧР в них із загального спектра імпульсних сигналів, що включає перешкоди. Таким же достоїнством володіє і метод фазових діаграм, що добре зарекомендував себе при діагностиці кабелів, електричних машин. На жаль, для трансформаторного обладнання поки що відсутні достатні дані за видами фазових діаграм для характерних видів дефектів.

Додаткову можливість для відстройки від перешкод дає "прив'язка" всіх імпульсів до синусоїди живлячої мережі, з розбивкою всіх імпульсів за деякими фазовим зонам. Для цього реєстрація всіх імпульсів проводиться з урахуванням фази робочої напруги в контрольованому високовольтному пристрої. Це надалі дозволяє більш ефективно провести аналіз стану ізоляції.

Аналіз АФД сигналів і їх часових параметрів дозволяє відфільтрувати сигнали корони, які мають дуже характерну форму і легко роз пізнаються по АФД. Звичайно, сигнали корони можуть маскувати сигнали ЧР від дефектів ізоляції з тією ж амплітудою і фазою, однак діапазон фазових кутів, в яких спостерігаються сигнали корони, невеликий, і ймовірність повного збігу АФД сигналів від дефекту і корони мала.

При достатній статистиці (при сумуванні даних вимірювань більш ніж за 500 періодів мережі) вдається зміряти сигнали ЧР, амплітуди яких в 10-100 разів менше, ніж у імпульсів корони. Сигнали від іскрових розрядів в елементах магнітопровода теж мають дуже характерну АФД, однак, амплітуда і інтенсивність цих сигналів можуть бути великі. На їх фоні виділити сигнали ЧР від дефектів високовольтної ізоляції досить важко. На щастя, такі дефекти спостерігаються досить рідко, і їх спостереження є одним із завдань діагностики. Крім того, сильна вібрація призводить до досить характерною залежності АФД цих сигналів від часу, яка дозволяє ідентифікувати дефекти такого типу. При ефективному усуненні зовнішніх перешкод електричний метод реєстрації дозволяє вимірювати з високою чутливістю параметри внутрішніх ЧР, визначати зону їх виникнення, а також природу ЧР. Вимірювання можуть проводитися одночасно за кількома схемами (у різних точках трансформатора), що полегшує визначення місця ЧР. Останньою стадією розділення сигналів ЧР у

високовольтній ізоляції і перешкод є порівняння сигналів електричного каналу з сигналами акустичного та електромагнітного каналів реєстрації.

2.4. Вимірювання часткових розрядів в умовах експлуатації

Врахування атмосферних умов при випробуваннях.

Якщо при випробуваннях високою напругою атмосферні умови відрізняються від нормальних, то виконується приведення (перерахування) нормованих випробних напруг до наявних умов.

Під нормальними атмосферними умовами відповідно до ГОСТ 1516.2-97 розуміють:

- температура повітря t_0 - 20°C;
- атмосферний тиск P_0 - 101300 Па (760 мм.рт.ст. або 1013 мбар.);
- абсолютна вологість h_0 - 11 г/м .

При випробуванні зовнішньої ізоляції при атмосферних умовах, які відрізняються від нормальних, випробні, витримувані та розрядні напруги повинні бути приведені до нормальних атмосферних умов.

Випробна напруга $U_{вип}$, яка прикладається до об'єкта, повинна дорівнювати нормованій випробній напрузі $1/U_{вип.0}$, помноженій на коефіцієнт приведення K

$$U_{вип} = U_{вип.0} \cdot K$$

Витримувана (розрядна) напруга $U_{роз.0}$ ($U_{роз.0}$), приведена до нормальних атмосферних умов, повинна дорівнювати розрахованому (вимірюваному) при випробуваннях $U_{вип.i}$, $U_{роз.0}$, поділеному на коефіцієнт приведення K

$$U_{вип.0} = \frac{U_{вип.i}}{K}$$

$$U_{роз.0} = \frac{U_{роз.i}}{K}$$

Коефіцієнт приведення K дорівнює добутку двох поправочних коефіцієнтів

$$K = K_1 \cdot K_2$$

де K_1 - поправочний коефіцієнт на густину повітря;

K_2 - поправочний коефіцієнт на вологість повітря.

Примітка: При випробуванні ізоляції під дощем та в умовах забруднення

поправочний коефіцієнт на вологість повітря $K_2=1$.

Поправочний коефіцієнт на густину повітря визначають по формулі

$$K_1 = \delta^m$$

де m - показник степені визначається по рис.1.2.;

δ - відносна густина повітря при випробуванні, визначається по формулі

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{293}{273 + t}$$

де P - атмосферний тиск при випробуванні, який визначений в таких же одиницях, що і нормальний атмосферний тиск P_0 ;

t - температура повітря при випробуванні, °C.

Поправочний коефіцієнт на вологість повітря визначають по формулі

$$K_2 = k^w$$

де: w - показник степені, визначається по рис.1.2.;

k - допоміжний параметр, який залежить від виду випробуваної напруги та відношення абсолютної вологи повітря при випробуванні h до відносної густини повітря δ . Значення параметра k визначають по рис. 2.11; в діапазоні значень відношення h/δ від 1 до 15 значення параметра допускається визначити по формулі для змінної напруги $k = 1 + 0,012 \left[\frac{h}{\delta} - 11 \right]$

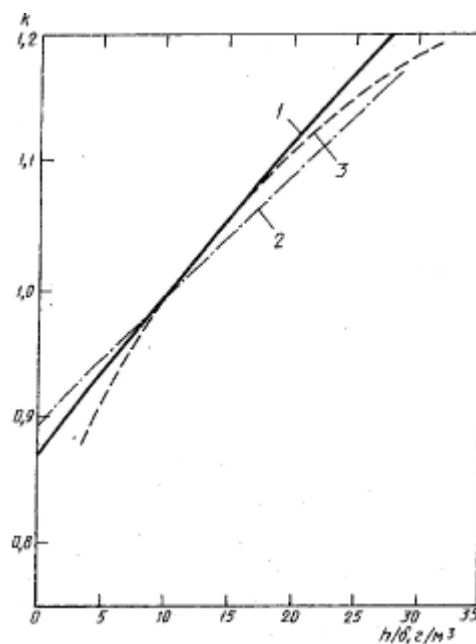


Рис. 2.11. Допоміжний параметр k в залежності від відношення h/δ .

1-змінна напруга; 2-імпульсна напруга; 3-постійна напруга.

Показники степені m та w для поправочних коефіцієнтів на атмосферні умови, які залежать від виду розряду та напруги, довжини та форми розрядного проміжку, атмосферних умов, можуть бути визначені по рис. 2.12 з використанням параметра q , який визначається по формулі

$$q = \frac{U}{L \cdot 500 \cdot \delta \cdot k}$$

де L - довжина мінімального розрядного проміжку на випробуваному об'єкті, м;

U - 50%-на розрядна або очікувана розрядна напруга (кВ) або, коли вони невідомі, 1,1 від випробної напруги.

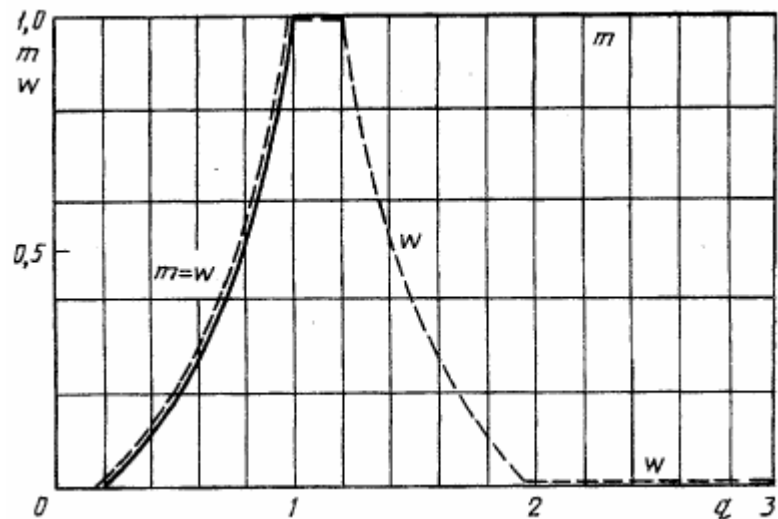


Рис. 2.12. Показники степені m та w

Вологість повітря h вимірюють з похибкою не більше ніж 1 г/м. Абсолютну вологість повітря при випробуваннях визначають по показанням сухого та вологого термометрів психрометра відповідно до рис. 2.13.

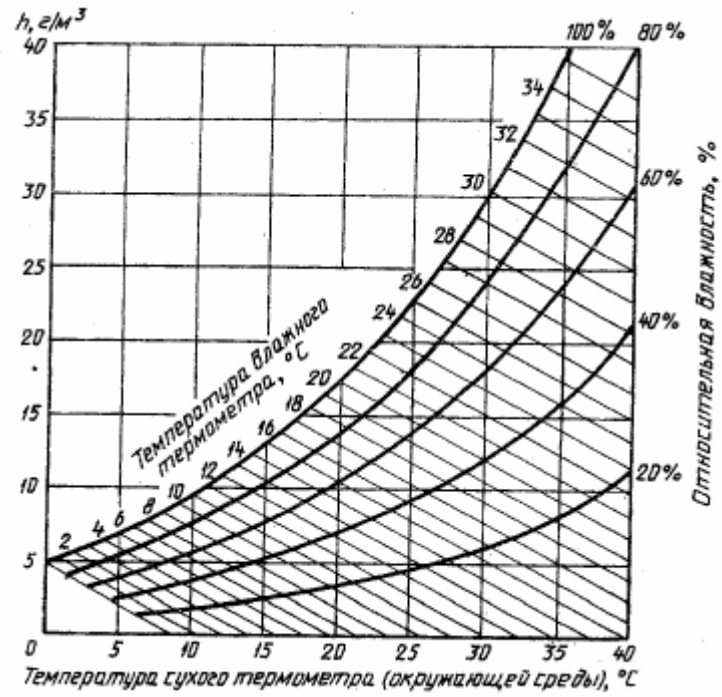


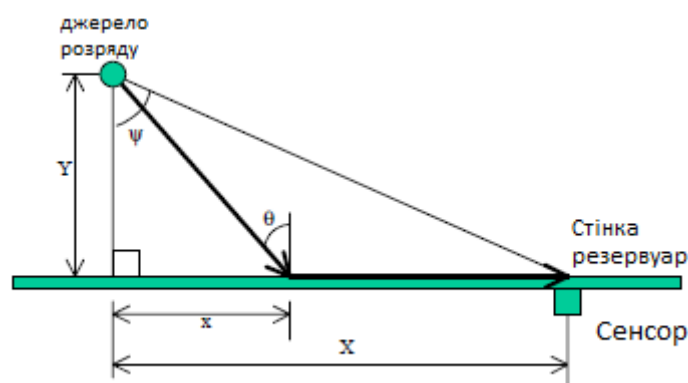
Рис. 2.13. Визначення абсолютної вологості повітря по показанням сухого та вологого термометрів

2.5. Акустичні методи контролю часткових розрядів

Існує два типи хвиль тиску: поздовжні і зсуву. Для поздовжніх середовище руху хвиль є суто в напрямку поширення. За допомогою зсувних хвиль рух є поперечний до напрямку поширення.

Рідини підтримують лише поздовжні хвилі. Для трансформаторного масла при нормальних робочих умовах, швидкість поширення становить $v_l \cong 1400 \text{ м / с}$. Трансформаторні баки зазвичай виготовляються із сталі, для якої поздовжні хвилі рухаються швидше, ніж зсувні хвилі: $v_l \cong 5900 \text{ м / с}$ і $v_s \cong 3200 \text{ м / с}$.

Імпульс ЧР створює сферичну хвилю тиску, яка потім збуджує поздовжні хвиля як і зсувна хвиля в трансформаторному баку. Аналогічно променевій оптиці, це можна трактувати як еквівалентне нескінченній кількості «пучків», що походять від місця розвантаження і поширюється однаково у всіх напрямки, кожне прибуття до стінки бака з іншого кута падіння θ . Таким чином, крім прямого шляху (пряма лінія між джерелом ЧР та датчиком), є багато інших непрямих шляхів, такі як ультразвуковий сигнал, який може рухатися до досягнення самого датчика. Через більшу швидкість поширення в сталі, прямий шлях - хоч і найкоротший, але не обов'язково вважається найшвидшим.



Мал.2.14. Модель ультразвукового поширення хвиль.

Розглядаючи малюнок 2.14 бачимо, що датчик який знаходиться під кутом ψ від нормального. І час, який потрібен для сигналу, який слідує по шляху, показаному на малюнку, щоб досягти датчика:

$$t = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{v_{\text{масла}}} + \frac{X - x}{v_{\text{сталі}}}$$

Найшвидший шлях можна знайти, встановивши $dt/dx = 0$ і вирішити значення x . Це відповідає випадку, коли θ дорівнює критичному куту падіння:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{v_{\text{масла}}}{v_{\text{сталі}}} \right)$$

а найшвидший час розповсюдження:

$$t_s = \frac{Y}{v_{\text{масла}} \cdot \cos \alpha} + \frac{X - Y \tan \alpha}{v_{\text{сталі}}}$$

Рівняння справедливе лише тоді, коли $\psi > \alpha$. Якщо $\psi \leq \alpha$, то прямий шлях (тобто $\theta = \psi$) – це найшвидший шлях. Розповсюдження часу прямого шляху:

$$t = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{v_{\text{масла}}}$$

У наведених вище рівняннях $v_{\text{масла}}$ та $v_{\text{сталі}}$ є швидкостями позовжніх поширень в маслі та сталі відповідно. Отриманий в результаті складений сигнал, підхоплений датчиком, є перекриттям сигналів, що проходять через безліч різних шляхів. Однак сигнал з найшвидшого шляху є найбільш критичним, оскільки він являє собою хвильовий фронт складеного сигналу. Початок цього хвильового фронту використовується при вимірюванні часу поширення.

Існує дві основні методи локалізації джерела скиду. Одним із поширених методів є одночасне записування електричних та ультразвукових сигналів. Приклад використання осцилографа цифрового накопичувача. Взявши електричний сигнал як опорний, можна визначити час поширення ультразвукового сигналу. Це, в свою чергу, може бути використане для обчислення відстані між джерелом розряду та датчиком (припускаючи прямолінійне поширення). Отже, місце можливих місць скидання буде частиною сфери, що лежить всередині межі резервуара трансформатора з датчиком як центром. Вимірювання в інших положеннях датчиків давали б додаткові локуси, а їх перетини забезпечували б місце розряду.

Припущення прямолінійного розповсюдження призведе до помилки в вимірюванні часу поширення. Абсолютна помилка:

$$\Delta t = t_s - t_d$$

Для зручності демонстрації масштабу цієї помилки, припустимо, що джерело ЧР знаходиться близько до стінки резервуара, так що $X \gg Y$. Замініть рівняння 3 та 4 на рівняння 5:

$$\Delta t \approx \left(\frac{1}{v_{\text{масла}}} - \frac{1}{v_{\text{сталі}}} \right) \cdot X$$

Відносна похибка:

$$\frac{\Delta t}{t_d} \approx \frac{v_{\text{сталі}} - v_{\text{масла}}}{v_{\text{сталі}}}$$

Таким чином, абсолютна похибка має тенденцію до лінійного збільшення з відстанню між датчиком і нормальним. З іншого боку, відносна похибка залишається постійною, але великою (76%).

Експеримент був встановлений за допомогою фактичного резервуара трансформатора, але з видаленими сердечником та обмотками (мал. _). Розмір цього бака, виготовлений із сталі товщиною 10 мм, становить 900 мм (В) x 1100 мм (В) x 600 мм (D).

В якості джерела розряду була використана система електродів "точка-площина", підвішена в маслі. Рівень розряду, вимірюваний звичайним детектором ПД, становив близько 1000 пк при напрузі 20 кВ. Положення джерела розряду було встановлено для всіх проведених вимірювань. Високочастотний КТ, обрізаний на земному кабелі, приймає електричний сигнал PD. Це використовується як еталон часу для визначення часу розповсюдження акустичні сигнали.

Ультразвукові хвилі тиску, що створюються розрядом, виявляються п'єзоелектричними датчиками. Ці датчики були затискані на зовнішніх стінках резервуара трансформатора за допомогою магнітів. Для кращого зчеплення хвиль тиску на поверхню датчиків наносили товстий шар мастила перед їх

прикріпленням до стінки резервуара. Джерело РД та датчики розміщені на одній горизонтальній площині, що знаходиться на 35 см над дном резервуара.

Положення джерела ЧР та датчиків показано на малюнку 5. Було випробувано ряд різних датчиків. РАС (тип R15I) є резонансними датчиками з вбудованим 40-дюймовим підсилювачем. Типовий діапазон роботи - від 100 кГц до 450 кГц, а резонансна частота - 160 кГц. В&К (тип 8312) - широкосмугові датчики, що працюють в більш широкому діапазоні частот. Відповідь рівна в межах 10 дБ в межах 100 кГц до 1 МГц. РАС (тип D9241A) є низькочастотним датчиком. Типовий діапазон роботи - від 30 кГц до 70 кГц.

Оскільки датчик знаходиться в нормі, прямий шлях є найшвидшим. Передбачуваний час розмноження становить 214 мкс порівняно з вимірюваним значенням 216 мкс. Зауважте, що в цьому випадку акустичний сигнал має гострий фронт хвилі, величина якого досягає свого максимуму майже на початку.

З рівняння 2 критичний кут падіння становить $13,73^\circ$. Це означає, що відстань 7,33 см від точки А. Отже, точка В знаходиться далеко поза критичним кутом. Порівняно з попереднім випадком (рис. 6), спостерігається помітна різниця у хвилі фронту. Сигнал є відносно невеликим протягом деякого часу, перш ніж його величина раптово зміниться. Останній відповідає приходу сигналу прямого шляху. Використовуючи рівняння 3, час поширення для найшвидшого шляху становить 293 мкс. Це добре узгоджується з вимірюваною величиною 300 мкс. Розрахунковий час поширення для прямого шляху становить $417\mu\text{s}$. Різниця в часі значна.

Таким чином, для місця розряду важливо розрізнати пряме та непряме поширення шляху. Як показано на Фіг.6 і 7, цього можна досягти, ретельно вивчивши форми хвиль часових областей прийнятих сигналів. На фіг.7 прихід сигналу прямого тракту може бути розташований шляхом ігнорування менших коливань на хвилі фронту. Це дає значення $380\mu\text{s}$ порівняно з очікуваним значенням $417\mu\text{s}$. Якщо вимірювання базується на найбільших коливаннях, результат дорівнює 450 мкс. Внутрішні бар'єри збільшують складність прийнятих сигналів. На фіг.8 показані результати для резонансного датчика в

нормі в точці С без бар'єру (плоска сталеві пластинка товщиною 10 мм). Передбачуваний час розмноження становить 250 мкс, що відповідає вимірюваній величині. Як очікувалося, форма хвилі схожа на фігуру 6 з різкою та великою хвилею. При наявності бар'єру результат показаний на фіг.9. Хоча помітний зсув часу не спостерігається, відносна величина хвилі фронту знижується. Форма хвилі дещо схожа. Таким чином, хоча датчик працює в нормі, його хвильова форма часової області має тенденцію вказувати інакше.

Замість бар'єру з металевої пластини джерело розряду було поставлено всередині циліндричного металевого бар'єру (діаметром 30 см). Форма хвилі, показана на фіг.10, все ще дещо схожа на фіг.9. Однак спостерігається помітне збільшення часу розмноження, 275 мкс порівняно з очікуваним значенням 250 мкс. Хоча циліндричний бар'єр має відкритий верх, можна помітити, що він більш ефективний для блокування поширення хвиль тиску. Для порівняння з результатами з використанням широкосмугового датчика. Форми хвиль набагато шумніші за рахунок ширшої пропускну здатності. Також показані відповідні частотні спектри. Компоненти більш високої частоти в діапазоні 400-500 кГц явно домінуючі на фіг.11, але стають незначними на. Це говорить про нову техніку розташування зливу. Використовуючи широкосмуговий датчик, можна змінювати розташування датчика до тих пір, поки компоненти максимальної частоти в детектованому сигналі не будуть максимально використані. Це відповідало б датчику в нормі. Зауважимо, що загальнозживаний резонансний датчик не підходить, оскільки частота, що представляє інтерес, знаходиться поза його діапазоном.

2.6. Індикація часткових розрядів в трансформаторах

Вимірювання часткових розрядів служить потужним інструментом діагностики для визначення стану ізоляційних елементів трансформатора. Особливе значення мають методи діагностування, що дозволяють виконувати оцінку стану обладнання, яке знаходиться в експлуатації, оскільки перерва в електропостачанні призводить до значних збитків. Найбільш передовими є методи акустичних (електромагнітних) вимірювань, які ґрунтуються на виявленні звукових(електромагнітних) коливань, що виникають при частковому розряді.

Вимірювання часткових розрядів в трансформаторах можна розділити на дві основні задачі. Перша полягає у забезпеченні заданої чутливості виявленню часткового розряду. Друга – у виявленні місця пошкодження (розташування часткового розряду).

Оскільки частковий розряд є джерелом акустичних або електромагнітних хвиль, то час досягнення таких сигналів стінок бака може бути використаний для його просторової локалізації.

Зазвичай для визначення місця розташування часткового розряду використовують два підходи. Перший підхід полягає в тому, що зміни, які відбуваються в амплітуді сигналу, або наявні спотворення форми сигналу на шляху його проходження, можуть дати рекомендації щодо місця розташування часткового розряду. З іншого боку, для виявлення джерела часткового розряду використовують час надходження сигналу до стінок досліджуваного об'єкта. Подальші пояснення стосуються останнього підходу.

Для локалізації використовують три різні методи, кожен з яких для свого описання використовує систему рівнянь з трьома невідомими (просторові координати часткового розряду) або чотирма (додаткова невідома часу). Новий підхід в обробці акустичних сигналів, в основі якого покладено псевдо-час, дозволяє використовувати стійку до помилок систему глобального позиціонування GPS (Global Positioning System) замість попередніх підходів.

Для роз'яснення методики і виведення основних виразів описання положення часткового розряду розглянемо схематичне зображення бака трансформатора з відповідними відомими і невідомими координатами датчиків і джерела часткового розряду відповідно (рис.1).

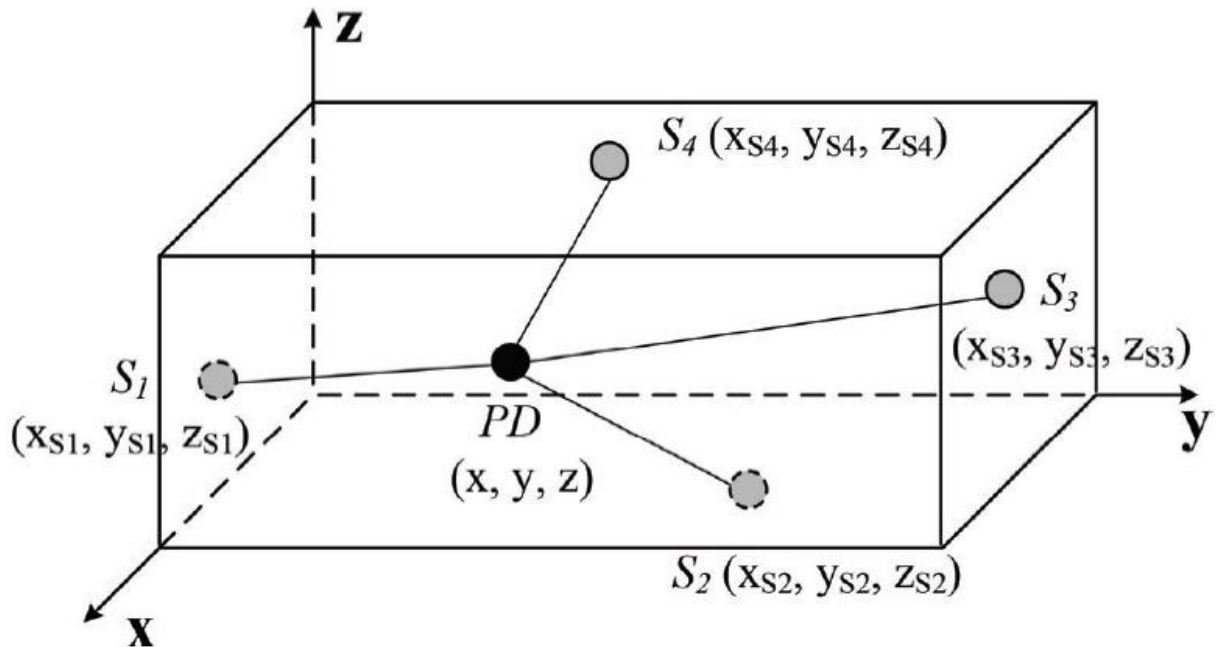


Рис.2.15. Схематичне розташування датчиків і місця часткового розряду.

Рис. 2.15 показує схематичний вигляд бака трансформатора, до якого приєднанні акустичні датчики i S з координатами (x, y, z) , наявний частковий розряд PD всередині бака з координатами (x, y, z) , результатна відстань i D від датчика i S до джерела часткового розряду PD . Частковий розряд являє собою зосереджене джерело, яке розповсюджує звукові (електромагнітні) коливання в однорідному середовищі. Відповідна система нелінійних рівнянь, які описують дану схему, в загальному випадку характеризується сферичними функціями, спільною точкою яких служить місце розташування часткового розряду (PD).

Вирізняють наступні методи описання нелінійних рівнянь:

1. Метод абсолютного часу.
2. Метод різниці часу.

Для певних видів вимірювань момент виникнення розряду відомий, тому це дає основу для введення величини абсолютного часу, як показано на рис.2.

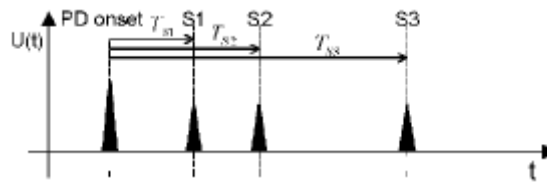


Рис.2.16. Часова діаграма розповсюдження імпульсу часткового розряду на основі методу абсолютного часу

Відповідні сферичні функції з трьома невідомими координатами часткового розряду в просторі (x, y, z) , вимірний час надходження T , прийнята швидкість γ , і декартові координати датчиків (x, y, z) мають відповідний взаємозв'язок:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (\gamma \cdot T_1)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (\gamma \cdot T_2)^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (\gamma \cdot T_3)^2 \end{cases}$$

Ці функції описують сфери з радіусами D , які визначаються за виразом:

$$D_i^2 = (\gamma \cdot T_n)^2$$

В разі застосування методу різниці часу хвиля досягає найближчого першого датчика, після чого починається відлік часу досягнення хвилею решти датчиків послідовно. Таким чином, маючи чотири датчики, ми можемо отримати три різниці часу з початку первинного надходження на перший датчик. Цей факт проілюстрований на рис.3.

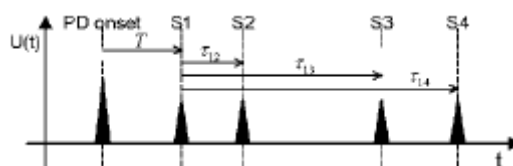


Рис. 2.17. Часова діаграма розповсюдження імпульсу часткового розряду на основі методу різниці часу

Нелінійна система рівнянь, яка описує дану методику, має вигляд:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (\gamma \cdot T)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (\gamma \cdot (T + \tau_2))^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (\gamma \cdot (T + \tau_3))^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = (\gamma \cdot (T + \tau_4))^2 \end{cases}$$

змінна – час зміщення Δt . На рис.4 зображено, як поєднуються між собою сигнали відносно невідомого початку виникнення часткового розряду.

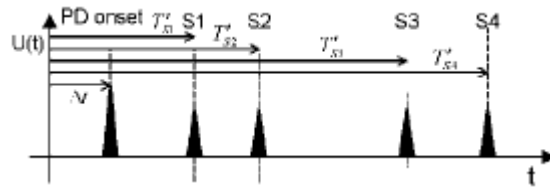


Рис. 2.18. Часова діаграма розповсюдження імпульсу часткового розряду на основі методу псевдо-часу

Система нелінійних рівнянь описується так, як і в попередніх методах, сферичними

функціями, але з додатковою невідомою Δt :

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (\gamma \cdot (T_1 - \Delta t))^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (\gamma \cdot (T_2 - \Delta t))^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (\gamma \cdot (T_3 - \Delta t))^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = (\gamma \cdot (T_4 - \Delta t))^2 \end{cases}$$

де $T_n - \Delta t = T$

Наявність додаткової невідомої часу Δt дозволяє перейти від розв'язання нелінійної системи до розв'язання лінійної із застосуванням методики, яка реалізується в системах позиціонування. Тому застосування цього методу вирізняється своєю новизною і забезпечує достатню точність при виявленні місця розташування часткового розряду.

Діагностування силових трансформаторів з визначенням місця розташування часткового розряду є перспективним засобом, який дозволяє виявити не тільки факт наявності недопустимих значень часткових розрядів, а й визначити можливі причини його виникнення.

Методи локалізації вже знайшли застосування в енергосистемах Великої Британії та знаходяться на стадії впровадження в Російській Федерації і, як показує статистика, це сприяє підвищенню надійності трансформаторів і відповідно енергосистем в цілому.

2.7. Індикація часткових розрядів в електричних апаратах

На основі різних типів сигналів, генерованих ЧР, ми узагальнюємо методи зондування ЧР на три основні категорії: електричне, акустичне та хімічне детектування. Фактично, ЧР також генерує тепло, і, таким чином, термічне виявлення для ЧР за допомогою датчиків температури звучить практично. Однак датчики температури не використовуються для виявлення ЧР у поточних літературах. Далі ми коротко представляємо кожен метод виявлення та датчики, що беруть участь у кожному методі. Крім того, ми також коротко вводимо локалізацію ЧР у цьому розділі.

- Електричне виявлення

Електричне виявлення ЧР засноване на електричних явищах, що супроводжуються розрядом, включаючи електромагнітне випромінювання та імпульси електричного струму. Датчики надвисокої частоти (ДНЧ) -антени здатні виявляти електромагнітні хвилі, що генеруються ЧР (зазвичай з діапазоном частот від 300 МГц до 3 ГГц). ДНЧ-датчики часто застосовуються для виявлення ЧР в газоізолюваних системах і трансформаторах. ДНЧ-датчики пропонують перевагу в тому, що зовнішній шум і порушення можуть ефективно захищатись. Тому ДНЧ-датчики для PD-сигналів останнім часом привертати все більшу увагу. Крім того, трансформатори з різною геометрією всередині матимуть різний опір, і таким чином датчики ДНЧ повинні бути повторно калібровані для різних типів трансформаторів. Датчики трансформатора струму високої частоти (ДТСВЧ) детектують імпульси струму високої частоти, що генеруються ЧР. Діапазон частот датчиків ДТСВЧ зазвичай становить від сотень кілогерців до десятків мегагерців, що, як було доведено, здатне захоплювати ЧР-сигнали. Датчики ДТСВЧ складаються з магнітного стрижня та екранованих обмоток, і вони затискаються навколо корпусу компонентів (наприклад, розподільних пристроїв та кабельних кінцівок) для вимірювання імпульсів струму. Датчики ДТСВЧ з розділеними сердечниками можна зручно застосовувати до обладнання високої напруги, не відключаючи жодної його

частини, тоді як ті, що мають закриті сердечники, як правило, для постійного моніторингу, і їх потрібно встановлювати до початку роботи.

- Акустичне виявлення

Акустичні датчики можуть використовуватися для виявлення звукових хвиль, що генеруються ЧР в звуковому та ультразвуковому діапазоні. Як правило, акустичні датчики застосовуються для виявлення ЧР в розподільних пристроях, газогазованих системах та трансформаторах. Акустичні датчики мають ряд переваг для виявлення сигналів ЧР. По-перше, вони легко встановлюються. Наприклад, вони можуть бути зручно встановлені на зовнішній стінці резервуара трансформатора, поки трансформатор залишається в повному обсязі. По-друге, акустичні датчики несприйнятливі до електромагнітних перешкод. По-третє, акустичні датчики, як правило, пов'язані з низькою ціною, але добре спрацьовують для локалізації джерел ЧР. Проте акустичні датчики страждають від власних обмежень, наприклад, вони менш чутливі через фоновий акустичний шум. Волоконно-оптичні акустичні датчики розроблені для підвищення їх чутливості для виявлення сигналу. Вони стають дуже привабливими для зондування ЧР через свої переваги (наприклад, висока чутливість, електрична непровідність та несприйнятливість до електромагнітних перешкод). Вони були розроблені різні волоконно-оптичні акустичні сенсорні системи для виявлення та локалізації ЧР в трансформаторах.

- Хімічне виявлення

Хімічне виявлення ПД засноване на тому, що розряд може утворювати нові хімічні компоненти за допомогою реакцій. Аналіз розчиненого газу (АРГ) є основним методом хімічного виявлення і він зосереджується на аналізі розчинених газів у трансформаторному маслі. Методи АРГ включають газову хроматографію, он-лайн моніторинг водню та фотоакустичну спектроскопію. Розподіл цих газів, зібраних за вищенаведеними методами, може допомогти виявити різні типи ЧР, виходячи з існуючих стандартів. Хімічне виявлення зазвичай нав'язливе і проводиться для компонентів, наповнених маслом,

наприклад трансформаторів. Це обмежує його застосування на інших компонентах. Крім того, хімічне виявлення не в змозі надати будь-яку інформацію про місце розташування ЧР.

- Локалізація джерела ЧР

Точне розміщення джерел ЧР важливо для цілей технічного обслуговування та ремонту. На малюнку — показаний приклад трансформаторного резервуара, де ЧР знаходиться всередині, а кілька датчиків розміщені зовні. Завдання локалізації ЧР в основному полягає в обчисленні декартових координат (x, y, z) ЧР. Аналіз часу прибуття є поширеним методом локалізації джерел ЧР. Далі ми впроваджуємо спільний підхід, заснований на аналізі часу прибуття.

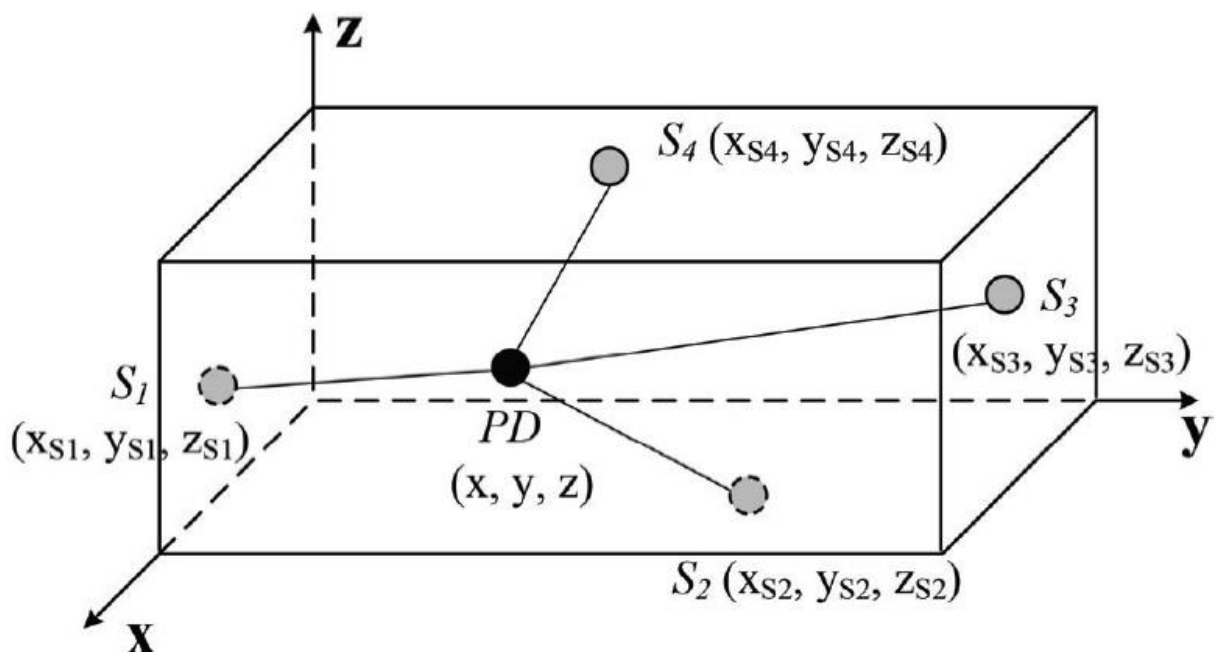


Рис. 2.19. Кілька датчиків (S_1 , S_2 , S_3 і S_4) встановлені на трансформаторному резервуарі з частковим розрядом (ЧР) всередині.

Припустимо, що S_1 є опорним датчиком, а час приходу ЧР на S_1 - T (T тут невідомо). Оскільки ми можемо зібрати різницю у часі приходу τ_{1i} між S_1 та S_i ($i > 1$), ми можемо мати таке рівняння 1. За чотирма рівняннями (тобто $1 \leq i \leq 4$) ми можемо таким чином обчислити (x, y, z) ЧР, а також час приходу T на опорний датчик. Зауважимо, що v рівняння 1 - швидкість звуку для акустичних

вимірювальних систем та швидкість світла для датчиків ДНЧ відповідно. Крім того, ми можемо знайти ЧР лише з 3 рівняннями, коли відомий час прибуття T , і цей сценарій також відомий як тріангуляція, яка використовується в глобальних системах позиціонування (GPS).

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = v^2 \cdot (T + \tau_n)^2$$

Як було введено вище, і датчики ДНЧ і акустичні датчики можна використовувати для локалізації ЧР. Крім того, датчики ДТСВЧ можуть бути використані для локалізації ЧР у зшитих поліетиленових кабелях на основі методу рефлектометрії часової області і тут деталі методу рефлектометрії часової області не вводяться. В основному, акустичні датчики, очевидно, досягли набагато кращих показників, ніж ДТСВЧ датчики для локалізації ЧР. Наприклад, похибка розташування, досягнута в за допомогою ДНЧ-датчиків, становила 14,33 см, тоді як розмірність баку трансформатора був $71,5 \times 118 \times 95$ див. Для трансформаторів, що мають аналогічні розміри, похибка розташування за допомогою акустичних датчиків становила 5,4 та 6 см відповідно.

- Підсумок виявлення та локалізації ЧР

Різні сенсорні системи мають свої переваги та обмеження. Наприклад, датчики ДНЧ мають високу чутливість для виявлення сигналу, тоді як волоконно-оптичні акустичні датчики мають переваги високої чутливості, електричної непровідності та несприйнятливості до електромагнітних перешкод. Як показано в роботі, сигнали, виявлені акустичними датчиками, були значно послаблені в кабельному з'єднанні. Між тим, чутливість виявлення датчиків трансформаторів струму радіочастоти (подібно до датчиків ДТСВЧ, але з нижчим діапазоном частот) виявилася непоганою, і тому автори додатково застосували метод позначання вейвлет для збільшення співвідношення сигнал-шум для сигнали від радіочастотних датчиків трансформатора струму.

2.8. Обладнання і пристрої для вимірювання часткових розрядів

Перевірка стану ізоляції включає в себе вимір опору ізоляції і випробування її електричної міцності . Перед перевіркою всі апарати , затискні збірки і інші деталі очищають від пилу і бруду . У разі необхідності проводять сушку відвологлих деталей і проводки.

Вимірювання опору ізоляції жив контрольних кабелів , Проводів , обмоток і контактів реле проводиться по відношенню до «землі» і між непов'язаними ланцюгами з допомогою мегомметра 1000-2500 В.

Перед вимірюванням опору ізоляції мегомметр перевіряють. При закорочених проводах і обертанні рукоятки мегомметра він повинен показувати «нуль», а при розімкнутих - нескінченність.

При вимірах ручку мегомметра необхідно обертати з рівномірної швидкістю близько 120 об / хв . При перевірці опору ізоляції відносно землі провід , що приєднується до «землі», підключають до клеми мегомметра, позначеному словом «земля», літерою «З» або знаком « \perp ». Під час перевірки опору ізоляції між ланцюгами дроти до Мегомметр приєднують довільно.

Працюючи з мегомметром, необхідно дотримуватися правила техніки безпеки . Провід , які приєднують до затискачів мегомметра, повинні мати опір ізоляції НЕ менше 100 МОм . Мегомметр і дроти повинні бути абсолютно сухими і чистими . При роботах на відкритій підстанції , в сирих приміщеннях і в сиру погоду мегомметр встановлюється на гумовий килимок, суху дошку і таму подібних. Проводи не повинні доторкатися сирої землі або заземлених металевих конструкцій і апаратів.

Для оцінки стану ізоляції окремих елементів схеми можна використовувати такі середні величини опорів справної ізоляції:

- дроти і реле на ізоляційній панелі - 100 МОм ;
- дроти і реле на металевій панелі - 50 МОм ;
- кабелі довжиною до 200-300 м - 25 МОм ;
- трансформатор струму , вбудований у втулку, без ланцюгів - 10-20 МОм;
- вторинні обмотки виносних трансформаторів струму - 50-100 МОм;

- елементи приводу - 15-25 МОм.
- Згідно ПУЕ та ПТЕ опір ізоляції відносно « землі » має бути не нижче:
- у шинок постійного струму і шинок напруги на щиті управління при відокремлених ланцюгах - 10 МОм;
- у повністю зібраної схеми вторинних ланцюгів окремого приєднання - 1 МОм;
- у ланцюгів , загальних з пристроями зв'язку - не менше 0,5 МОм.

Перевірка ізоляції з допомогою мегомметра проводиться як при новому включенні , так і при кожній плановій перевірці пристрою .

При перевірці ізоляції між фазами в струмових ланцюгах , де є двообмоткові реле з обмотками, включеними в різні фази (наприклад , реле опору), необхідно враховувати , що вони мають знижену електричну міцність ізоляції між обмотками. Тому ізоляція між ланцюгами в цьому випадку повинна перевірятися мегомметром на напругу 500 В.

Величина опору ізоляції , який би великий вона ні була , недостатньо характеризує стан ізоляції. Тому, крім вимірювання опору ізоляції, перевіряється її електрична міцність, тобто здатність протистояти підвищеному напрузі . Оскільки при вимірюванні ізоляції опором 1 МОм напруга на затискачах мегомметра 1000 В внаслідок падіння напруги в його внутрішньому опорі зменшується приблизно в 2 рази нижче його номінальної величини (до 450 В), він не може бути використаний для випробування міцності ізоляції .

Випробування електричної міцності ізоляції щодо « землі » проводиться при новому включенні і періодично 1 раз в 3-4 року у час планових перевірок. Випробування проводиться змінним напругою 1000 В в протягом 1 хв по схемі , показаній на малюнку 12. У цій схемі використовується трансформатор напруги ТН, наприклад типу НОСК, потужністю 200-300 ВА. Регулювання напруги здійснюється потенціометром R1 підключеним з первинної сторони ТН. Замість потенціометра можна використовувати автотрансформатор. Для зменшення величини струму в разі пробоя ізоляції служить обмежує опір R2 порядку 1000 Ом . Напруга , що прикладається до ізоляції , вимірюється вольтметром V, послідовно з яким включено обмежує опір R3. Струм, що проходить в

випробуваної ланцюга, вимірюється з допомогою міліамперметра , обмотка якого нормально зашунтувати кнопкою Кн . Міліамперметр вводиться в ланцюг натисканням кнопки тільки на момент виробництва виміру . Завдяки цьому запобігається його перевантаження великим ємнісним струмом при підключенні до випробувальної установки контрольних кабелів значною довжини.

Всі ланцюги, які повинні бути випробувані, підключаються до випробувальної установки . Знімаються всі заземлення , встановлені нормально у випробовуваних ланцюгах. З схеми виключаються або закорочуються все пристрої , що не розраховані на випробувальний напруга 1000 В (акумуляторні батареї , напівпровідникові прилади , електронні лампи і т. П.). Після підготовки випробувальної схеми напруга від установки плавно піднімають до 500 В і деякий час тримають на такому рівні . При цьому міліамперметром вимірюють струм в ланцюзі, оглядають всю випробувальну апаратуру . Якщо при цьому НЕ помічено поштовхів напруги , розрядів , іскор , піднімають напругу до 1000 В, тримають в протягом 1 хв , вимірюють струм навантаження ТН, а потім плавно знижують напругу до нуля.

Якщо під час перевірки відбудеться пробій ізоляції, напруга різко знизиться , а струм в перевірній ланцюга збільшиться.

До і після випробування електричної міцності ізоляції вимірюють її опір мегомметром 1000-2500 В. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування , якщо при напрузі 1000 В не відзначалося пробіїв , іскор , різких кидків напруги , а величина опору ізоляції після випробування НЕ знизилася .

Якщо під час випробувань ізоляція буде пробита, необхідно знайти і виділити пошкоджений ділянку , а потім повторити випробування.

Для випробування міцності ізоляції щодо « землі » і між непов'язаними ланцюгами застосовується також мегомметр на 2500 В.

При випробуванні ізоляції підвищеним напругою необхідно дотримуватися правила техніки безпеки . Всі місця , куди може бути подано випробувальне напруга, повинні бути огорожені, або близько них повинні знаходитися люди для попередження про небезпеку .

2.9. Огляд сучасних методик аналізу результатів вимірювань часткових розрядів.

Для сигналів ЧР від детекторів ЧР у Таблиці _ ми зазвичай представляємо їх у двох різних шаблонах, а саме - шаблонах, що розв'язуються за часом, і шаблонах, що визначаються фазою, як показано на малюнку _. тобто форма хвилі $q(t)$, де q - амплітуда (тобто видима напруга заряду або розряду), а t показує інформацію про час. Фіг. _ (В) демонструє візерунок, розв'язаний з фазою, тобто шаблон $\phi-q-n$, де ϕ - фазовий кут імпульсу ЧР, q також відноситься до видимої напруги заряду або розряду, а n - кількість імпульсів. Далі ми познайомимо функції, витягнуті як із форм хвилі, так і з фазовим чином.

Крім того, загальне подання для моделей, що вирішуються фазами, базується на методі фазового вікна. Метод фазового вікна розділяє цикл живлення на 360° на кілька невеликих фазових вікон, а потім генерує деякі функції для кожного фазового вікна. Наприклад, у нас є 360 вікон, якщо кожне фазове вікно має розмір 1° . Припустимо, що у нас є три особливості для кожного фазового вікна, а саме кількість імпульсів, максимальна амплітуда та середня амплітуда в цьому фазовому вікні. Таким чином, ми можемо представити фазороздільну картину з розмірним вектором $360 \times 3 = 1080$. Через прокляття розмірності важко проаналізувати, зрозуміти та візуалізувати такі високомірні дані (наприклад, 1080 розмірних даних, як це було введено вище). Таким чином, важливі методи екстрагування для зменшення розмірності були б важливими, перш ніж ми зможемо проаналізувати дані ЧР. У цьому розділі ми також запровадимо аналіз основних компонентів (АОК) та розподілене t стохастичне сусіднє вбудовування (t -ССВ) для зменшення розмірності функції.

Табл. 2.2 Особливості різних методів і сенсорів часткового виявлення розряду

Пункт	Датчики надвисокої частоти	Датчики трансформаторів струму високої частоти	Оптичні акустичні датчики	Аналіз розчиненого газу
Сигнали	Електромагнітні хвилі	Імпульс електричного струму	Акустичні хвилі	не застосовується
Частота сигналу	0,300–3 ГГц	3–30 МГц	10–300 кГц	не застосовується
Труднощі з установкою	Помірний	Легко	Легко	Помірний
Можливість локалізації часткового розряду	Обмежений	Обмежений	Так	Ні

Характеристика імпульсу

Припускаючи, що максимальна амплітуда імпульсу дорівнює A , ми можемо отримати такі ознаки для опису форми імпульсу від форми хвилі, наприклад, час наростання імпульсу, час згасання та ширина (тривалість) імпульсу.

- Час підйому імпульсу (t_r): час, необхідний для збільшення від 0,1А до 0,9А
- Час розпаду імпульсу (t_d): час, необхідний для зменшення з 0,9 до 0,1 А
- Ширина імпульсу (два): часовий інтервал між 0,5 А з обох сторін

Статистичні особливості

Враховуючи набір імпульсів, фазово-розділена модель є хорошим поданням для них, як було сказано вище. Фазоподібний малюнок спочатку ділиться на багато фазових вікон, наприклад, кожне фазове вікно має 1° , і таким чином у нас може бути 360 фазових вікон. Потім ми можемо витягти деякі

функції у кожному фазовому вікні, наприклад, кількість імпульсів, максимальну амплітуду та середню амплітуду. Статистичні моменти цих особливостей для всіх фазових вікон можуть бути вилучені для подальшого подання заданого набору імпульсів. Припустимо, що у нас є фазові вікна N , а x_i - це специфічне значення функції для i -го фазового вікна. Середнє значення x_i для цих вікон фази N буде $\mu = \sum_{t=1}^N x_i / N$. 1 Якщо ми вважаємо, що фазові вікна можуть мати різну важливість (нехай $p(x_i)$ буде важливістю i -го фазового вікна), середньозважене значення обчислюється таким чином у рівнянні 2. Для простоти інші статистичні дані, наприклад, дисперсія (σ^2), похилість (γ) та ексцес (k) визначаються наступним чином, не враховуючи значення фазових вікон.

$$\text{Середньозважене значення } (\omega^\infty): \omega^\infty = \frac{\sum_{t=1}^N x_i p(x_i)}{\sum_{t=1}^N p(x_i)}$$

$$\text{Варіантність } (\sigma^2): \sigma^2 = \frac{\sum_{t=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}$$

$$\text{Скошеність } (\gamma): \gamma = \frac{\sum_{t=1}^N (x_i - \mu)^3}{\sigma^3 \cdot N}$$

$$\text{Ексцес } (k): k = \frac{\sum_{t=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4 \cdot N} - 3$$

У наведених вище визначеннях скошеності і ексцесу обчислюються відносно нормального розподілу. Нахил - це міра асиметрії або ступеня нахилу даних відносно нормального розподілу, що має косий нуль. Негативні значення для скошеності вказують на дані, котрі перекошені ліворуч (лівий хвіст довший, ніж правий хвіст), а позитивні - на перекошені справа. Ексцес - показник різкості розподілу. Якщо розподіл має таку ж різкість, як і звичайний розподіл, ексцесу дорівнює нулю. Негативні значення ексцесу вказують на розподіл більш плоский, ніж у звичайного, тоді як позитивні - на різкіше. Імпульси ЧР зазвичай трапляються як у позитивній, так і в негативній половині циклу напруги. Можна виділити кілька особливостей, щоб визначити

відмінності між двома половинами. Детальну інформацію про такі ознаки, наприклад, асиметрія розряду та коефіцієнт перехрещення. Нагадаємо, що ми використовуємо функціональний вектор з 1080 розмірами, щоб представити набір імпульсів, заснований на методі фазового вікна, тобто 360 фазових вікон \times 3 ознак із шаблону фазового дозволу. Тепер ми розглядаємо три ознаки з фазоворозв'язаної схеми як три розподіли, і у нас є чотири з наведених вище статистичних ознак, тобто середнє значення, дисперсія, скошеність і ексцес, які розраховуються окремо для цих трьох розподілів. Зауважимо, що всі ці характеристики обчислюються для циклів позитивної та негативної напруги. Отже, у нас є $3 \times 4 \times 2 = 24$ функції. Крім того, ми маємо шість особливостей від асиметрії розряду та коефіцієнта перехресної кореляції. Загалом ми витягуємо 30 ознак на основі статистичних моментів. Таким чином, розмір функції для набору імпульсів значно зменшується, порівняно з 1080 ознаками, заснованими на методі фазового вікна.

Спосіб обробки сигналів

Перетворення вейвлетів є загальним методом обробки сигналів для різних сигналів, включаючи аудіосигнали, зображення тощо. Особливо підходить для аналізу неправильних та неперіодичних сигналів. У цьому розділі ми зупинимось на його застосуванні для отримання функцій для даних ЧР.

Вейвлет $\psi(t)$ - малий сигнал хвильового типу із середнім значенням нуля (тобто, $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$) і кінцевою енергією (тобто, $\int_{-\infty}^{+\infty} [\Psi(t)]^2 dt < \infty$). Неперервне вейвлет-перетворення (НВП) сигналу $f(t)$ стосовно вейвлета $\psi(t)$ визначається таким чином:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = 0$$

де a - масштабний коефіцієнт, а b - коефіцієнт перекладу. Коефіцієнт масштабу призначений для стиснення і розтягування материнської вейвлети,

тоді як коефіцієнт перекладу призначений для зміщення функції вейвлет $\psi(t)$ вздовж осі часу. І a , і b є безперервними змінними в НВП. Якщо встановити $a = 2^j$ і $b = n \cdot a$ в рівнянні 6, причому n і j є цілими числами, то отримаємо дискретне вейвлет-перетворення (ДВП). ДВП може бути реалізований за відомим пірамідальним алгоритмом, заснованим на багаторезольюційному аналізі, як показано на малюнку 1. Сигнал розкладається на сигнал апроксимації та детальний сигнал відповідно на напівдіапазонних низькочастотних та високочастотних фільтрах. Сигнал наближення можна додатково розкласти на два сигнали інтерактивно. Таким чином, ДВП рівня k генерує $(k + 1)$ сигнали $(cD1, \dots, cDk, cAk)$, де cDi - детальний сигнал на i -му рівні, $1 \leq i \leq k$, а cAk - сигнал наближення на k -й рівень. Подібно до ДВП, вейвлет-пакетне перетворення (ВПП) - це інший тип вейвлет-перетворення, де сигнал на кожному рівні буде розкладений на два сигнали двома напівдіапазонними фільтрами. Таким чином, для декомпозиції рівня k , WPT виробляє 2^k різних сигналів. У вихідний сигнал ЧР ЧР S був перетворений на n сигналів розкладання $(dS1, \dots, dSn)$ за допомогою ДВП. Сигнал розкладання dSi має енергію $E_1 = \sum_1 dS_1(t)^2$. Потім S представляється нормалізованим енергетичним вектором $E_1' = E_1 / (\sum_{j=1}^n E_j)$. Ці енергетичні коефіцієнти для даних ЧР були створені для розрізнення різних типів джерел ЧР через кластеризацію.

k -рівень ВВП застосовувався для генерації 2^k сигналів розкладання для вихідного ЧР-сигналу S . У роботі автори розраховують енергію, скошеність та куртоз для цих 2^k сигналів розкладання, а також $2^k - 1$ проміжних сигналів. Однак кожен сигнал ЧР має велику кількість особливостей, тобто $3 \times (2^{k+1} - 1)$ функції та вибір функції необхідний для подальшого аналізу в цій роботі. Кожному рівню будуть присвоєні 4 ознаки, а саме: середнє (μ_i), дисперсія (σ_i^2), перекошення (γ_i) та ексцес (κ_i) для сигналів цього рівня. Отже, оригінальні сигнали ЧР присвоюються $4k$ ознаками ($k = 9$ і, таким чином, 36 ознак у). Зауважимо, що статистичні моменти тут були отримані для форм хвиль з розподілу амплітуди розряду проти часу.

АОК

Аналіз основних компонентів - це загальна статистична методика вилучення ознак та зменшення розмірності. Ми можемо представити m екземплярів даних з n особливостями у вигляді матриці даних $\in \mathbb{R}^{m \times n}$. Якщо припустити, що X нормалізується (кожен стовпець із середнім значенням 0), $C = (1/n) X^T X$ - матриця коваріації X . Тут X^T - це перенесення X і $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Згодом обчислюємо власні значення та власні вектори для C на основі розкладання власних значень. Наприклад, λ - власне значення, а $v \in \mathbb{R}^n$ - його власний вектор, якщо $\lambda v = Cv$. Потім вибираємо власні значення верхнього p та їх власні вектори, а $V = \mathbb{R}^{n \times p}$ - матриця, що складається з цих p власних векторів ($p < n$). Нарешті, дані з n -вимірного простору X відображаються в p -розмірний простір X_{pca} за допомогою $X_{pca} = XV$.

АОК для даних форми сигналу

Кожен імпульс ПД був представлений своєю формою хвилі як вектор-розмірність 2 000 (2000 точок за період вибірки 20 мкс). Потім було застосовано АОК для зменшення розмірної характеристики з 2000 до 2 для візуалізації та групування імпульсів ЧР. В роботі кожен імпульс ЧР був представлений своєю формою хвилі у вигляді 5000-розмірного вектора. Трансформація ЧР імпульсів з часової області (форми хвилі) в частотну область через перетворення Фур'є зменшила розмірність кожного сигналу з 5000 до 2500. АОК також зменшив розмір функції з 2500 до 6 для ієрархічного кластерного аналізу. Розкладання вейвлет на формі хвилі імпульсу ЧР генерує для цього імпульсу ряд коефіцієнтів енергії вейвлет (наприклад, 6 коефіцієнтів енергії). АОК додатково зменшив розмірність з 6 до 3 для візуалізації та кластеризації ЧР.

АОК для фазово-розв'язаних даних

Вектор характеристики для фазово-розділеної картини, як показано на рисунку 3 (В), мав 600 розмірів (200 фазових вікон \times 3 функції у кожному фазовому вікні). Потім АОК зменшив розмірність з 600 до 7 для класифікації

джерел ЧР. Кожен візерунок, розв'язаний фазою, мав векторний ознака з 1440 розмірами (360 фазових вікон \times 4 функції у кожному фазовому вікні). АОК аналогічно застосовували для зменшення розмірності для класифікації джерел PD.

Методика зменшення рівномірності (t-SNE)

t-SNE - ще одна методика зменшення розмірності, яка нещодавно була розроблена для візуалізації даних високих розмірів. t-SNE має на меті проектувати дані на низькомірний простір і зберігати їх парне відстань або подібність. Для цього t-SNE спочатку будує розподіл ймовірності P над парами об'єктів високого розміру таким чином, що два подібних об'єкта мають високий показник ймовірності, тоді як різні точки мають низький показник ймовірності. Нехай p_{ij} позначає ймовірність пари (x_i, x_j) у просторовому просторі. Аналогічно, t-SNE визначає розподіл ймовірностей Q над точками на низькомірній карті, а q_{ij} - ймовірність для відповідної пари (y_i, y_j) у просторі низького розміру. З огляду на те, що два розподіли ймовірності P і Q схожі або близькі, дві близькі точки x_i і x_j у просторі великого розміру, ймовірно, будуть поруч у діловому розмірпростір. Отже, t-SNE використовує дивергенцію Куллбека-Лейблера (KL) у рівнянні 7 для вимірювання відстані між двома розподілами P і Q . Мінімізуючи розбіжність KL між P і Q , t-SNE, таким чином, зменшує розмірність вихідних даних і зберігає їх парне відстань або подібність.

$$KL(P||Q) = \sum_{j \neq i} P_{ij} \log \frac{P_{ij}}{q_{ij}}$$

Розкладання вейвлет на формі хвилі імпульсу ЧР генерує 10 коефіцієнтів енергії вейвлет для цього імпульсу. t-SNE додатково зменшує розмірність з 10 до 3 для візуалізації та кластеризації імпульсів ЧР. вектор характеристик для кожної фази, розв'язаної фазою, має 600 розмірів, а t-SNE знижує розмірність з 600 до 7 для класифікації джерел ЧР.

Підсумок

Для методу вилучення конкретних особливостей ми також наведемо в таблиці посилання, де він використовувався для аналізу даних ЧР. Перша категорія ознак виводиться безпосередньо з форм хвиль або з фазовим рішенням, а другий тип ознак - це такі, що генеруються методами зменшення розмірності ознак, наприклад, АОК і t-SNE. Ці два типи особливостей мають свої переваги. Особливості першого типу мають більш чіткі фізичні значення і можуть досягати кращої продуктивності для аналізу даних ЧР, ніж другий тип функцій. Наприклад, у, ДВП для вилучення особливостей з форм хвиль забезпечує найкращий набір функцій. Статистичні оператори (наприклад, перекося, куртоз тощо) - другий найкращий набір функцій, які кращі, ніж ті, які генеруються АОК та ядра АОК. Функції другого типу, як правило, мають низьку розмірність і прості для візуалізації. Однак вони, як правило, є поєднанням оригінальних рис, і тому важко інтерпретувати їх фізичні значення.

2.9.1. Кластерний аналіз часткових розрядів

Після того, як сигнали ЧР представлені в просторі функцій, ми можемо проаналізувати їх, базуючись як на техніках розпізнавання, так і під наглядом. У цьому розділі ми вводимо різні методи кластеризації сигналів ЧР (методи без нагляду). У наступному розділі ми представимо різні моделі класифікації сигналів ЧР (контрольовані методи).

Алгоритми кластеризації ділять об'єкти на групи, так що об'єкти в одній групі більше схожі між собою, ніж на ті, що знаходяться в іншій групі. Імпульси ЧР від одного і того ж джерела ЧР мають тенденцію до подібних характеристик (наприклад, подібні форми хвиль або фазово-розділені структури). Таким чином, алгоритми кластеризації широко використовуються для поділу декількох джерел ЧР.

Зараз ресурс розроблено до 40-50% електроенергетичного обладнання. Це означає, що першочерговою метою оцінки технічного стану електрообладнання, за винятком запобіжних випадків, є продовження ресурсу роботи. Відповідно, зростає роль методів діагностики електрообладнання, що перебуває на роботі (в режимі реального часу). Статистичні дослідження ІЕЕ (Інститут електричної енергетики) показують, що понад 37% відмов і поломки синхронних генераторів та електродвигунів викликані дефектами статорів електричної ізоляції та роторів цих машин. Основними механізмами штучного старіння ізоляції під час експлуатації електричного обладнання є перегрів, циклічні навантаження, видалення напівпровідникового покриття котушок внаслідок вібрації, стратифікація ізоляції, відтік внаслідок забруднення. Повний пробій ізоляції в звичайних умовах експлуатації виникає не відразу. Як правило, цьому передують мікрополомки, що перекривають частину ізоляції, названу частковим розрядом (ЧР). Мікрополомки викликають руйнування ізоляції і, нарешті, повний зрив. Час від виникнення первинного ЧР до повного розриву ізоляції в більшості фіксованих випадків становить від декількох тижнів до декількох років. Таким чином, параметри ЧР і, зокрема, контроль їх зміни, є важливими діагностичними ознаками для оцінки технічного стану ізоляції, що дозволяє виявити дефекти на

ранній стадії їх розробки, спланувати та провести оптимальне фінансування ремонту робота електрообладнання. Можна виділити наступні важливі переваги:

- справді руйнуючі механізми, виявляється ступінь руйнування та старіння ізоляції;
- контролюється процес старіння ізоляції в часі;
- на основі отриманих даних конкретні передбачувані технічні дії (конденсація котушок, очищення тощо) плануються з огляду на фінансовий стан підприємства;
- виключено надмірне проведення капітального ремонту електрообладнання.

ЧР супроводжуються короткими імпульсами струму і напруги з передніми 1-5 наносекундами (частота 50-250 МГц) і амплітудою від декількох мВ до декількох сотень мВ залежно від типу ізоляції, системи охолодження електричної машини, робоча напруга, ступінь старіння та режим її роботи. Вони можуть реєструватися електричними датчиками, підключеними до магістралі високої напруги через конденсатор з'єднання (або його еквівалент), електромагнітними датчиками за допомогою зовнішніх антен спеціальної конструкції та акустичних датчиків, що записують звукові ефекти з ЧР.

Основна інформація джерела ЧР передається з їх амплітудою, фазою та частотою. Оскільки ЧР мають випадковий характер, тобто всі їх параметри сильно різняться в часі і мають великі випадкові розлади, що, природно, зареєстровані імпульси мають однакові властивості. Тому найбільш значущі параметри - це не характеристики окремо взятих імпульсів ЧР, а деякі середні значення параметрів імпульсів ЧР та форми їх розподілу за амплітудою та фазою (що стосується управління напругою, прикладеною до об'єкта).

Кластерний аналіз - багатовимірна статистична процедура, що виконує збір даних, що містять інформацію про вибірку об'єктів, і потім впорядковує об'єкти в порівняно однорідні групи. Завдання кластеризації відноситься до статистичної обробки, а також до широкого класу задач навчання без учителя.

Більшість дослідників схилиються до того, що вперше термін «кластерний аналіз» був запропонований математиком Р. Тріона. Згодом виник ряд термінів, які в даний час прийнято вважати синонімами терміна «кластерний аналіз»: автоматична класифікація, ботріологія.

Спектр застосувань кластерного аналізу дуже широкий: його використовують в археології, медицині, психології, хімії, біології, державному управлінні, філології, антропології, маркетингу, соціології, геології та інших дисциплінах. Однак універсальність застосування призвела до появи великої кількості несумісних термінів, методів і підходів, що ускладнюють однозначне використання і несуперечливу інтерпретацію кластерного аналізу.

Аналіз ЧР вимагає обробки величезних файлів даних, на основі яких необхідно виділити джерела дійсних процесів руйнування ізоляції електричною машиною. Існуючі методи статистичної обробки інформації вимагають апіорністичного знання законів розподілу даних у розглянутих координатах (для ЧР його рівень $\pm Q$, частота повторення $\pm NQN$ та положення імпульсів ЧР ϕ щодо фази напруги 50 (60) Гц) для різних рівнів (градації) технічного стану. Вирішення проблеми прогнозування технічного стану на основі аналізу ЧР може бути досягнуто, використовуючи алгоритми кластеризації, що не вимагає апіорністичної інформації про закони розподілу параметрів ЧР для різних рівнів технічного стану обладнання. Аналіз кластеризації являє собою сукупність методів формування однорідних класів у будь-якій області великих обсягів даних, які застосовуються до неформалізованих або погано формалізованих задач різної фізичної природи, не використовуючи апіорністичних припущень про ймовірність природи вихідної інформації та з використанням евристичних причин щодо властивостей процесу (об'єкта). Початкові дані поділяються на групи (кластери), елементи яких мають подібні властивості (атрибути), і для їх різниці вводиться деяка критеріальна функція. Алгоритми кластеризації не вимагають припущень, необхідних для статистичних методів, і можуть використовуватися в умовах відсутності інформації про закони розподілу даних. Розглянутий процес або об'єкт

представлений у вигляді набору кластерів, елементи яких мають кількісні, якісні або змішані властивості, згруповані в матриці нагляду X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{Mn} \end{bmatrix}$$

Кожен рядок представляє значення n атрибутів одного з кластеризованих M об'єктів. В якості функції критерію зазвичай розглядається відстань між початковими елементами об'єкта (лініями матриці X) або від елементів до кластерів-прототипів. Алгоритми кластеризації можуть бути точними та нечіткими. При точному алгоритмі кластеризації початковий об'єкт X представлений як неперекреслені підмножини. Таким чином, будь-який елемент з X належить лише одному кластеру. Нечітка кластеризація розділяє об'єкт X на перехрещені підмножини, елементи яких мають різний ступінь аксесуара. Кількість скупчень може бути як заздалегідь відомою, так і невідомою людиною. Заздалегідь не можна визначити розглянуту проблему, оскільки параметри джерел ЧР та рівень відповідного їм технічного стану невідомі. Загальні положення алгоритму кластеризації без завдання кількісних кластерів або методу гірської (віднімальної) кластеризації пропонуються Ягеру Р., Філеву Д.

1. Встановлюються потенційні центри кластерів S . Як правило, вони можуть бути спостережуваними об'єктами (вимірювання параметрів процесу), матрицями X , що відповідають лініям, тобто $S = M$.

2. Потенціал центрів кластера:

$$P(Z_h) = \sum_{k=1, M} \exp(-\alpha \cdot D(Z_h, X_k)), h = \overline{1, S}$$

де $Z_h = (z_{1,k}, z_{2,k}, \dots, z_{n,k})$ - потенційний центр кластера h , $h = \overline{1, S}$, α - позитивна константа,

$D(Z_h, X_k)$ - відстань між центром Z_h потенційного кластера та об'єктом кластеризації X_k .

У звичайному просторі ця відстань визначається формулою:

$$D(Z_h, X_k) = \sqrt{\|Z_h - X_k\|^2}$$

де норма - $\|Z_h - X_k\|^2 = (Z_h - X_k) \cdot B \cdot (Z_h - X_k)^\tau$, B - одноразова матриця, τ - позначення операції транспонування матриці.

3. Як координати центрів кластера вибирають значення атрибутів з найбільшим потенціалом, виключаючи вплив попередньо вибраного кластера на наступний. Для цього від поточних значень потенційного віднімають внесок центрально знайденого кластера (тому кластеризацію за цим методом іноді називають віднімаючою). Перерахунок потенціалу відбувається за формулою:

$$P_2(Z_h) = P_1(Z_h) - P_1(V_1) \cdot \exp(-\beta \cdot D(Z_h \cdot V_1))$$

де $P_1(.)$ - потенціал на 1-й ітерації, $P_2(.)$ - потенціал на 2-й ітераціях, V_1 - центр першого знайденого кластера:

$$V_1 = \arg_{z_1, z_2, \dots, z_s} \max(P_1(Z_1), P_1(Z_2), \dots, P_1(Z_s)), \beta - \text{позитивна константа.}$$

Центр другого кластеру визначається по максимуму оновленого потенціалу

$$V_1 = \arg_{z_1, z_2, \dots, z_s} \max(P_2(Z_1), P_2(Z_2), \dots, P_2(Z_s)),.$$

Потім значення потенціалів третього кластера за формулою (3.4) знову перераховується. Центри кластерів ітераційно розподіляються за формулами (3.2) - (3.4), тоді як значення розрахункового потенціалу перевищує деяке задане порогове значення. Таким чином, методом субтрактивного нечіткого кластеризації буде те, що кожна точка даних вважається центром потенційного кластера, для якого обчислюється критеріальна функція - щільність інших точок даних навколо. Інша назва даного методу - кластеризація гір, показує той факт, що потенціали кластерів із даних простей представляються як вершини гір, висота (потенціал) яких окупається, використовуючи експоненціальну форму подання відстані між точками даних. Як обрані вершини (кластер), висота (потенціал) яких визначена, перевищує деяке задане значення.

2.9.2. Метод k-середніх

Алгоритм k-середніх - це ітераційний алгоритм, який намагається розділити набір даних на окремі підгрупи (кластери), визначені, де кожна точка даних належить лише одній групі. Він намагається зробити точки даних між кластерами максимально схожими, зберігаючи кластери якомога більше (далеко). Він призначає точки даних кластеру таким чином, що сума квадрату відстані між точками даних та центроїдом кластера (середнє арифметичне всіх точок даних, що належать до цього кластеру) є мінімальним. Чим менше варіацій у нас в кластерах, тим гомогенними (подібними) точки даних є в межах одного кластеру.

Алгоритм k-середніх працює таким чином:

- Вкажіть кількість кластерів K .
- Ініціалізуйте центроїди, спочатку перемішуючи набір даних, а потім випадковим чином вибираючи K точки для даних центроїдів без заміни.
- Продовжуйте ітерацію, поки не зміниться центроїд. тобто призначення точок даних кластерам не змінюється.
- Обчисліть суму квадратної відстані між точками даних та всіма центроїдами.
- Призначте кожному точці даних найближчому кластеру (центроїд).
- Обчисліть центроїди для кластерів, взявши середнє значення всіх точок даних, що належать кожному кластеру.

Метод k-середніх - це широко використовуваний алгоритм кластеризації на основі центроїдів. K - заданий користувачем параметр, тобто кількість бажаних кластерів. Це ітеративна методика уточнення на наступних етапах. По-перше, K початкові центроїди вибираються випадковим чином. По-друге, кластери K утворюються шляхом присвоєння кожному об'єкту його найближчому центроїду (крок призначення). По-третє, оновлюється центроїд кожного кластеру (етап оновлення). K - означає, що кластеризація триває шляхом чергування кроку призначення та кроку оновлення до тих пір, поки воно не сходиться. Насправді, вищевказаний ітераційний процес є евристичним

алгоритмом мінімізації функції оптимізації в рівнянні яке нижче. Тут $C = \{C_1, \dots, C_k\}$ - це набір k кластерів, а o_i - центроїдкластер C_i .

$$\arg \min_C \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - o_i\|^2$$

Усі підходи [11], [44], [45], [54], [55] використовували алгоритм К-засобів для групування сигналів у різні кластери. Їх відмінність полягає в особливостях, отриманих для кластеризації. У роботі [44] сигнали ЧР були представлені функційним вектором зі статистикою фазово-розділених шаблонів (тобто, косості, куртозу, асиметрії та коефіцієнта перехресної кореляції). У роботі [54] автори запропонували нормалізовану функцію автокореляції для записаних сигналів, яка узагальнює як часові, так і частотні характеристики області. Крім того, подібність між двома сигналами вимірюється коефіцієнтом кореляції Пірсона між їх нормалізованими функціями автокореляції. В роботі [45] автори вперше вилучили особливості форми імпульсу (наприклад, час підйому та спадання імпульсу, максимальна амплітуда тощо) та створили кластери з К-засобами. Потім вони об'єднували кластери на основі діапазону розподілу імпульсних еквівалентних частот для досягнення оптимальних результатів кластеризації. У роботі [11] було вилучено дев'ять ознак для сигналів, записаних датчиками УВЧ, засновані переважно на амплітуді та часових інтервалах між двома послідовними імпульсами. У роботі [55] імпульси ЧР були представлені їх амплітудами та фазовими кутами, і правила застосовувались для визначення джерела ЧР для кожного кластера виходячи з його форми.

Метод k -середніх - це простий та ефективний метод кластеризації, який широко використовується. Однак К-засоби також мають два обмеження. З одного боку, це може сходитися до локального мінімуму рівняння, яке є вище. З іншого боку, нам потрібно вказати кількість кластерів k , хоча часто задавати задану кількість кластерів досить складно, оскільки ми можемо не мати уявлення про кількість джерел ЧР.

2.9.3. Нейронні мережі

Нейронні мережі - це моделі машинного навчання, натхненні центральною нервовою системою тварин (наприклад, мозку). Нейронна мережа, як правило, складається з вхідного шару, вихідного шару та одного або декількох прихованих шарів, як показано на рисунку 2.20 (В) (нейронна мережа без прихованого шару часто позначається як "перцептрон"). Вузли (звані "нейрон") в мережі з'єднують усі вузли в попередньому та наступних шарах з різною вагою (називаються "синапсами"). Крім того, кожен нейрон у вхідному шарі є вхідною ознакою, тоді як кожен нейрон у вихідному шарі є передбачуваним класом. Нейрон обчислює зважену суму вхідних сигналів і має нелінійну функцію активації, щоб визначити, активний він чи ні.

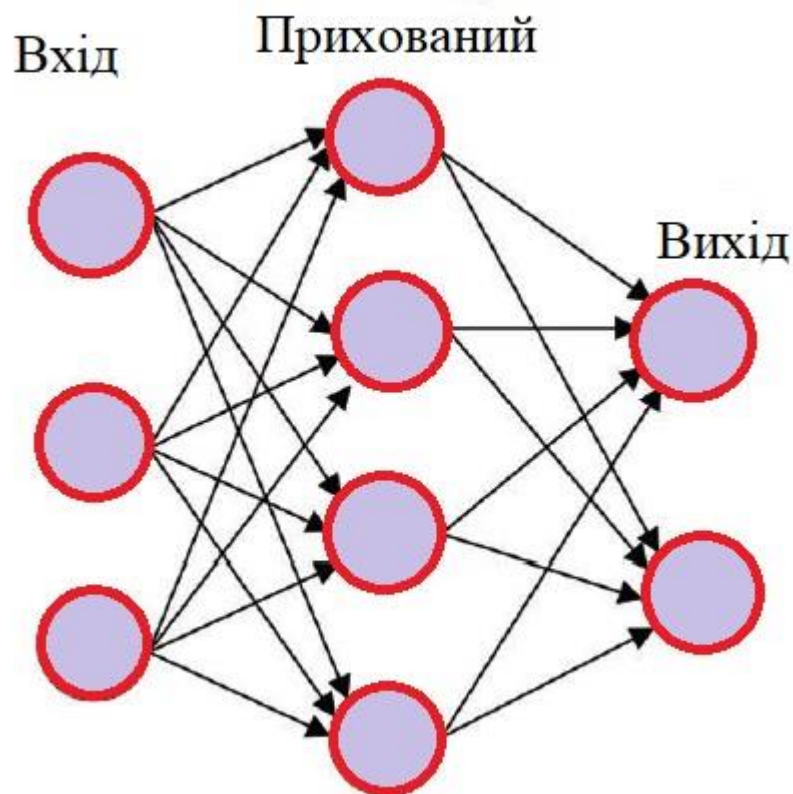


Рис.2.20. Приклад багатошарової нейронної мережі

Під час навчального етапу ми зазвичай вивчаємо нелінійне відображення між входом та виходом, яке фактично визначається вагою ребер та нейронів у мережі. Зокрема, алгоритм зворотного розповсюдження - це поширений метод,

розроблений для вивчення цих ваг. Ці ваги, засвоєні на етапі тренувань, будуть використані для класифікації нових примірників.

Нейромережа - одна з найпопулярніших методик класифікації, що використовується для аналізу ЧР. У [42] автори провели всебічний огляд методик нейронної мережі, що використовувались для аналізу ЧР до 2003 р. Наприклад, ці два дослідження [43], [44], в яких використовували нейронні мережі зі статистичними ознаками для аналізу даних ЧР, були також розглянуто у вищенаведеному опитуванні. Пізніше різні методи нейронної мережі все ще широко використовуються для аналізу даних ЧР.

В роботі [45] вхідними даними нейронної мережі були відсотки газів (наприклад, H_2 , C_2H_2 та C_2H_4), які генерувалися DGA. Виходячи з вхідних даних, нейронна мережа потім класифікувала несправності трансформатора як перегрів, розряд та ПД. Як показано в їх експериментах, навчена нейронна мережа перевершила критерії IEC 60599, який широко використовується для інтерпретації результатів DGA. Крім того, з нечіткими правилами, витягнутими з нейронної мережі, автори надали вдосконалену таблицю IEC для інтерпретації результатів DGA.

В [46] автори вперше зібрали 8 типів даних ЧР, які виникали в системах паперо-масляної ізоляції, порушених процесами старіння. Потім вони витягували функції з областей частоти та частоти частот для сигналів ЧР. Нейронна мережа була нарешті використана для класифікації різних типів ЧР. В [47] вперше застосовано WPT для створення ряду функцій, а 6 ознак були отримані за допомогою стратегії вибору функцій. Пізніше нейронна мережа була використана для розділення корони та інших типів D. Крім того, для класифікації джерел ЧР також використовувались нейронну мережу зворотного розповсюдження та різні нейронні мережі, наприклад, багат шаровий перцептрон та радіальну базу.

2.9.4. Дерево ухвалення рішень

Методи дерева рішень будують структуру, подібну до діаграми, як показано на малюнку 2.21, в якій внутрішній вузол являє собою тест на ознаку, кожен вузол листа представляє мітку класу, а шлях від кореня до листа представляє правило класифікації. Дерево рішень будується таким чином "зверху вниз", тобто корінь і пізніше внутрішні вузли ітеративно розбиваються, поки не будуть виконані певні критерії і цей процес вирощування дерев не припиняється. Домішки (сформульовані за допомогою ентропії та індексу Джині) - одне з найпопулярніших вимірювань, яке використовується для побудови дерева рішень. Різниця домішок між вузлом та його дочірніми вузлами (тобто посилення інформації) використовується для вибору найкращої точки розщеплення вузла. Крім того, ми вважаємо вузол із домішкою, нижчим за порігбути листям, і це було б природним умовою зупинки для будівництва дерева.

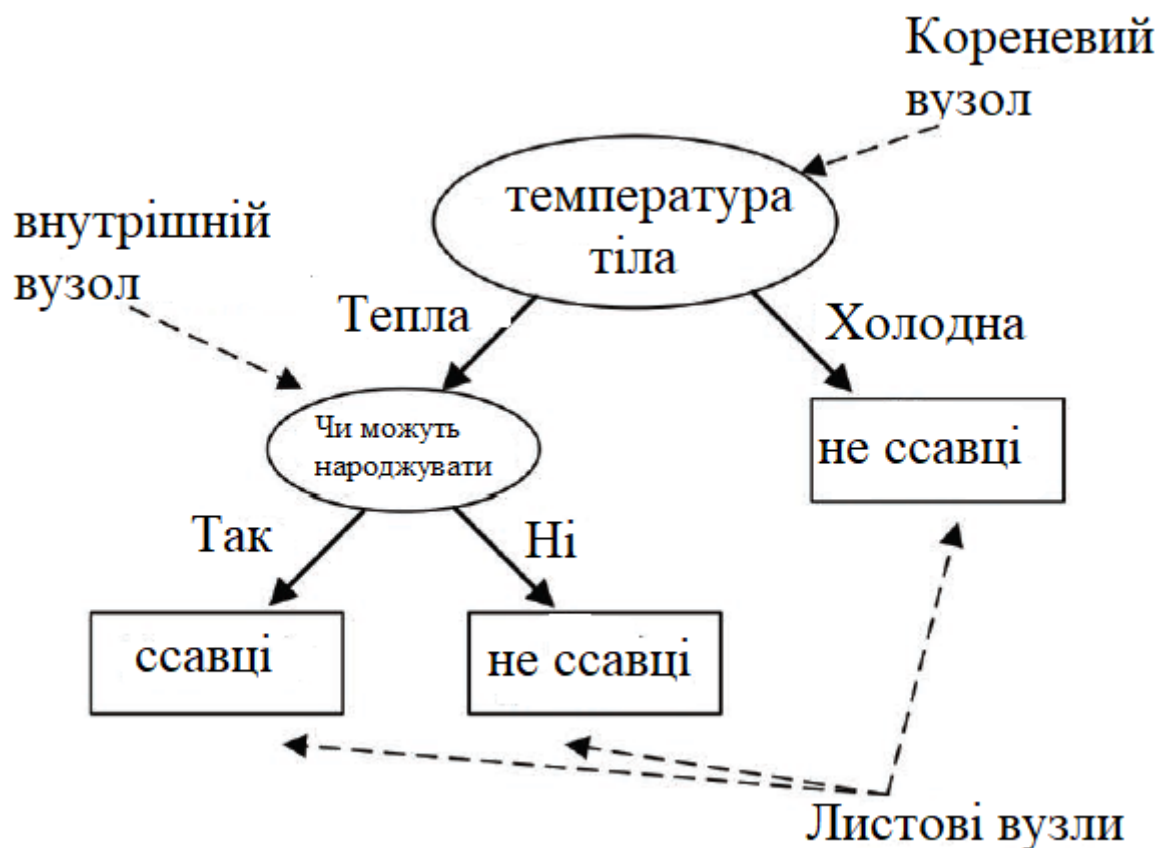


Рис. 2.21. Дерево вирішення проблеми класифікації ссавців

Методи дерева рішень широко використовуються для завдань класифікації, пов'язаних з ЧР, в різних сценаріях. Ознаки були витягнуті з форми імпульсів ЧР, наприклад, час наростання імпульсу, час розпаду, ширина імпульсу тощо. Дерево рішень за цими ознаками було використано для класифікації розмірів порожнеч чи порожнин у діелектричні зразки. Дерево рішень було використано для оцінки глибини та розмірів порожнин у високовольтних кабелях. Крім того, методи дерева рішень використовувались для класифікації сигналів та шумів ЧР та диференціації декількох джерел ЧР.

Не як нейронна мережа або SVM як чорні скриньки, дерево рішень надає нам видимі правила особливостей класифікації, які легко зрозуміти та інтерпретувати.

2.10. Висновки по розділу 2

Діагностика технічного стану електрообладнання може здійснюватися як спеціальними приладами, якими виробляються прямі вимірювання електричних параметрів контрольованих об'єктів традиційними методами, так і приладами для вимірювання непрямих характеристик електрообладнання, наприклад, температури поверхні, на безконтактному вимірюванні який заснований теплової неруйнівний контроль – тепловізіонная діагностика. Метод дозволяє здійснювати високопродуктивний безконтактний контроль електрообладнання в процесі роботи без знеструмлення об'єкту і виявляти багато дефекти на ранній стадії їх розвитку, попереджаючи виникнення аварій та надзвичайних ситуацій в системах енергопостачання.

Розроблена методика в даний час успішно застосована при натурних обстеженнях більше 50 об'єктів на практиці.

Тепловізійний контроль став важливим інструментом для обстеження стану різного електротехнічного обладнання енергосистеми: трансформаторів струму і напруги, роз'єднувачів, вентильних розрядників, високовольтних вводів, силових трансформаторів, масляних вимикачів, якості пайки обмоток статора турбогенераторів при ремонтних роботах електродвигунів, димових труб і газоходів та інші.

Проблема забезпечення використовуваними технологіями якості пайки з'єднувальних голівок статорних обмоток ТГ при проведенні ремонтних робіт на сьогоднішній день досить актуальна. Необхідна перевірка якості пайки за допомогою послідовного тепловізійного контролю та вимірювання опору постійному струму обмоток статора ТГ.

Для об'єктивного визначення технічного стану обладнання електротехнічних комплексів пропонується використовувати програмно-інформаційну діагностичну систему, яка дозволяє здійснювати збір та обробку первинної інформації на працюючому електрообладнанні за допомогою сучасних, високоефективних діагностичних засобів, видачу результатів обробки цієї інформації в зручній формі, передачу цієї інформації в архів; звернення до

довідково-інформаційний масив; постановку попереднього діагнозу; прийняття рішення про подальші діагностичних операціях. Діагностична система включає переліки контрольованих вузлів різних типів електроустановок, що виявляються дефектів, методи контролю та параметри, що характеризують експлуатаційний стан. Враховано метрологічна забезпеченість, необхідний рівень автоматизації і сумісність засобів вимірювання з ПЕОМ, зручність і наочність вихідної інформації.

Діагностична система показала високу ефективність при вирішенні завдань раннього виявлення дефектів високовольтного обладнання; прогнозування розвитку дефектів, оцінки їх небезпеки; визначення обсягу ремонтно-відновлювальних робіт; оптимізації ремонтно-технічного обслуговування обладнання.

Також у цьому параграфі були вивчені акустичні сигнали, що створюються частковими розрядами в масляних трансформаторах. Було показано, що часто використовувані резонансні датчики дають сигнал низького рівня шуму. Для вимірювання часу поширення це вигідно. Хоча широкосмугові датчики дають шумніший сигнал, положення датчика по відношенню до джерела розряду можна визначити, аналізуючи компоненти високої частоти спектрів. Це може бути використане як новий метод розташування скидів. Певною мірою можна відрізнити пряме та непряме поширення шляху шляхом вивчення форм хвиль часової області. Однак було показано, що наявність внутрішніх бар'єрів може змінити не тільки отримані форми хвиль, але і час поширення. Діаграма часового масштабу перетворення вейвлет є цікавим та інформативним способом перегляду сигналів. Метод також може бути використаний для знеструмлення сигналів і, таким чином, підвищення чутливості виявлення.

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ ПРИ ЗМІННОМУ ТА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ

3.1. Середовище моделювання

Середовище для моделювання має відповідати певним вимогам. Воно повинно містити в собі всі елементи, і виконувати функції, необхідні для забезпечення належного моделювання часткових розрядів в ізоляції висковольтного та електричного обладнання в цілому. До того ж воно має бути простим і зрозумілим у використанні. Саме таким середовищем було обрано Micro-Cap — SPICE-подібну програму схемотехнічного аналізу, тому що вона має зручний, дружній інтерфейс і пред'являє достатньо скромні вимоги до програмно-апаратних засобів персонального комп'ютера. Micro-Cap дозволяє виконувати змішане моделювання аналого-цифрових електронних пристроїв, що особливо важливо в моделюванні електроенергетичних пристроїв.

3.2. Моделювання часткових розрядів

В середовищі Micro-Cap були створені імітаційні моделі часткових розрядів при дії змінного та постійного струму. Вони базуються на схемі заміщення діелектрика з газовим включенням [1].

Для відтворення іскрового проміжку, як приклад, було обрано спеціально розроблений електронний розрядник, виконаний за допомогою двох тригерів Шмітта (Schmitt trigger) та двох ключів (switch) [2]. Надалі всі моделі схем будуть імітуватись за допомогою цілісного розрядника (sparkgap) [3], який надає більш широкі можливості для моделювання.

Всі елементи схем визначено так, щоб отримані результати моделювання відповідали фізиці досліджуваного процесу.

Наведемо модель схеми випробувань з імітуванням часткових розрядів при змінному струмі (рис.3.1.1).

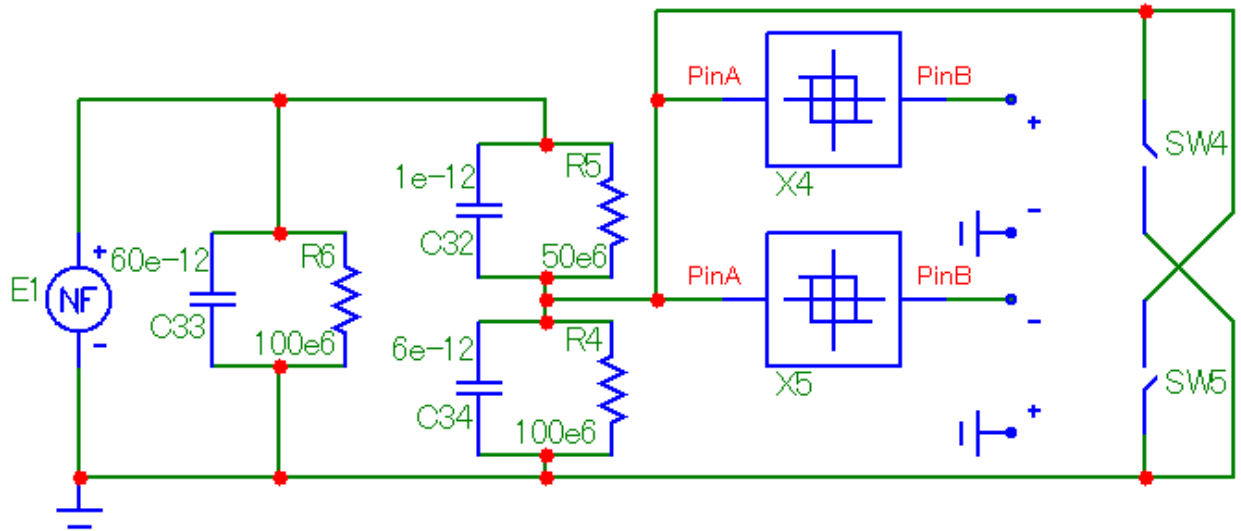


Рис. 3.1.1. SPICE-модель схеми об'єкта випробувань при змінному струмі частотою 50 Гц з імітуванням іскрового проміжку за допомогою двох тригерів Шмітта та двох ключів відповідно.

Результати дослідження SPICE-моделі схеми об'єкта випробувань при змінному струмі показані на рис. 3.1.2.

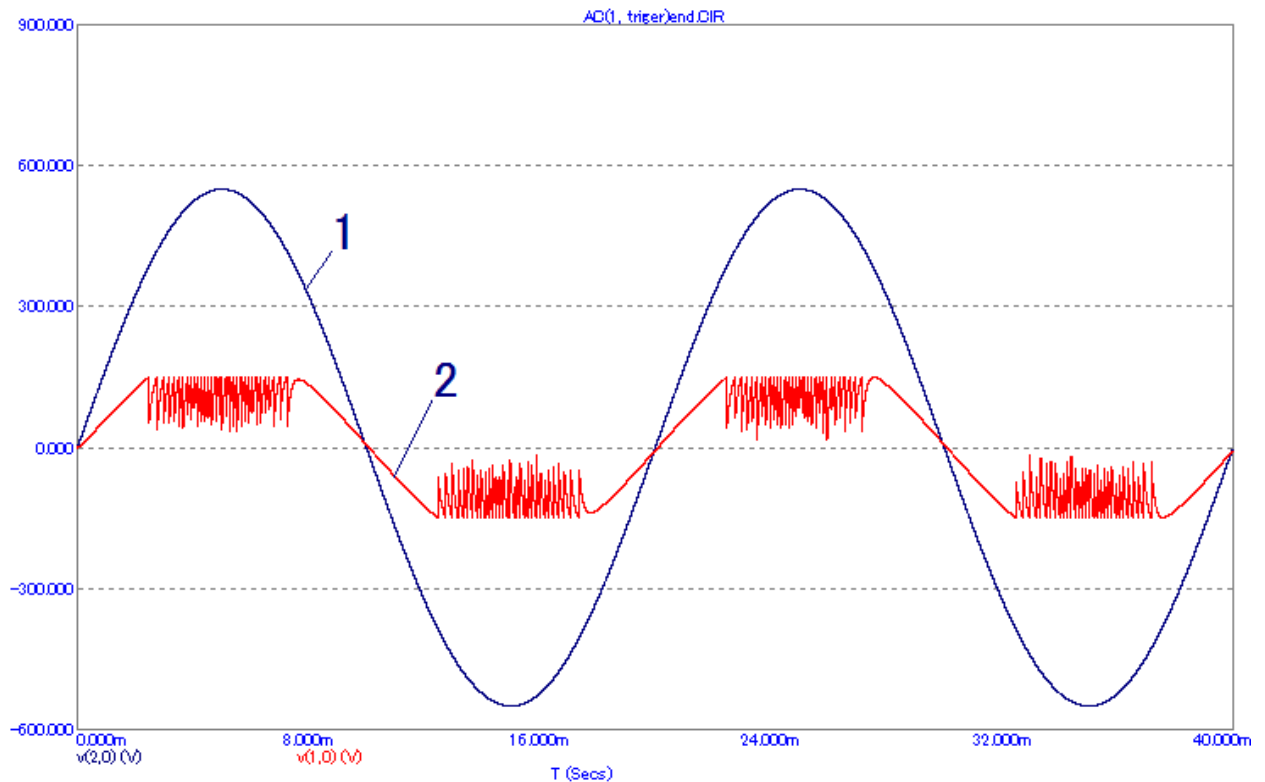


Рис.3.1.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1) та при наявності ЧР (2) (тригери Шмітта).

SPICE-модель схеми випробувань з імітуванням часткових розрядів при постійному струмі (рис.3.2.1).

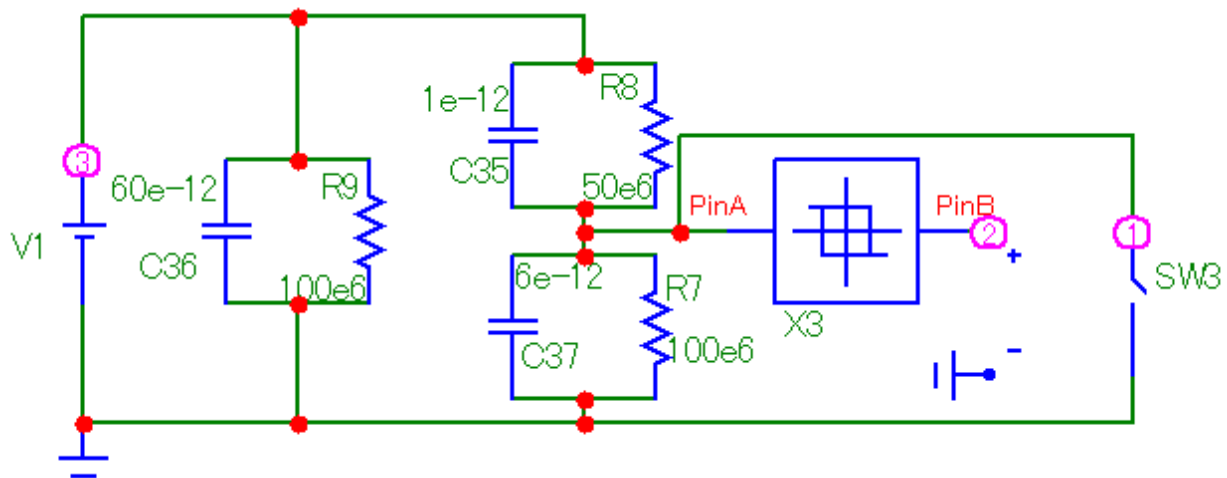


Рис. 3.2.1. SPICE-модель схеми об'єкта випробувань при постійному струмі з імітуванням іскрового проміжку за допомогою тригера Шмітта та ключа.

Результати дослідження SPICE-моделі схеми об'єкта випробувань при постійному струмі показані на рис. 3.2.2.

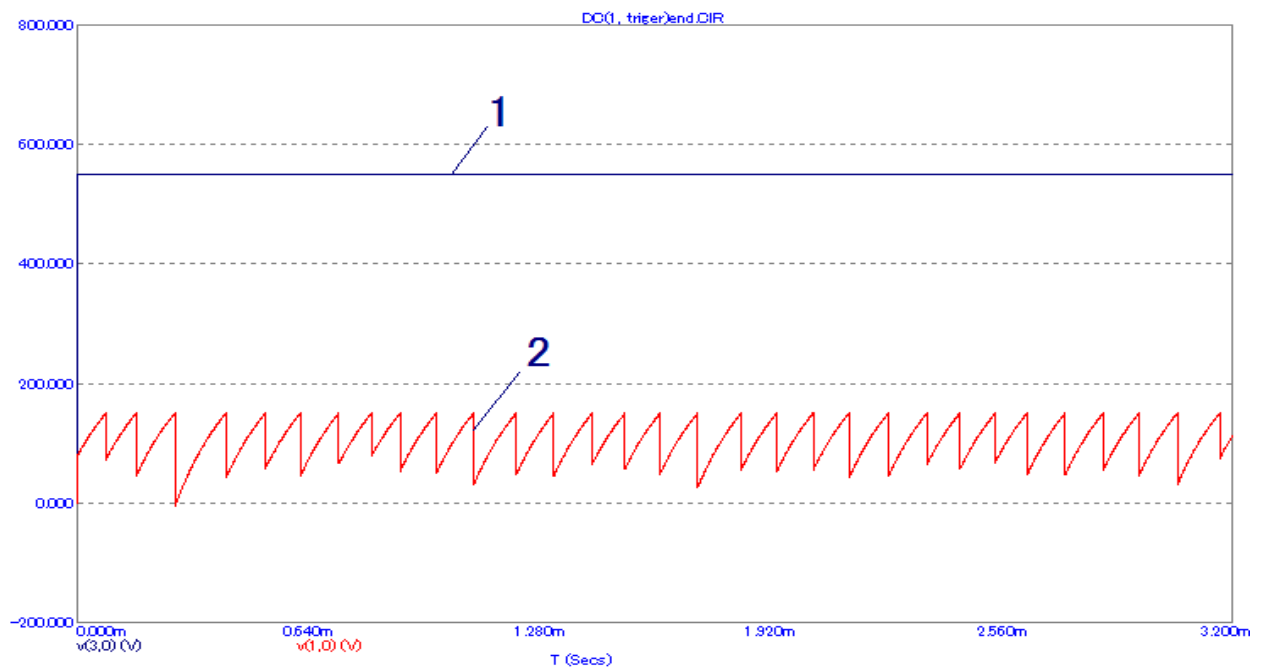


Рис.3.2.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1) та при наявності ЧР (2) (тригер Шмітта).

За отриманими осцилограмами (рис. 3.1.2, 3.2.2) можна сказати, що частота появи часткових розрядів при змінному струмі приблизно в 1,3 рази менша ніж при постійному струмі.

3.3 Моделювання систем вимірювання часткових розрядів

3.3.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Змінний струм

Для побудови SPICE-моделі схеми реєстрації часткових розрядів потрібно розрахувати пасивний фільтр високої частоти.

В Micro-Cap запропоновано три фільтри високої частоти: Баттерворта, Чебишева та Еліптичний. Розрахуємо їх та порівняємо між собою.

Змодельовані схеми реєстрації часткових розрядів наведені в [4].

Розрахуємо фільтр Баттерворта для обох схем.

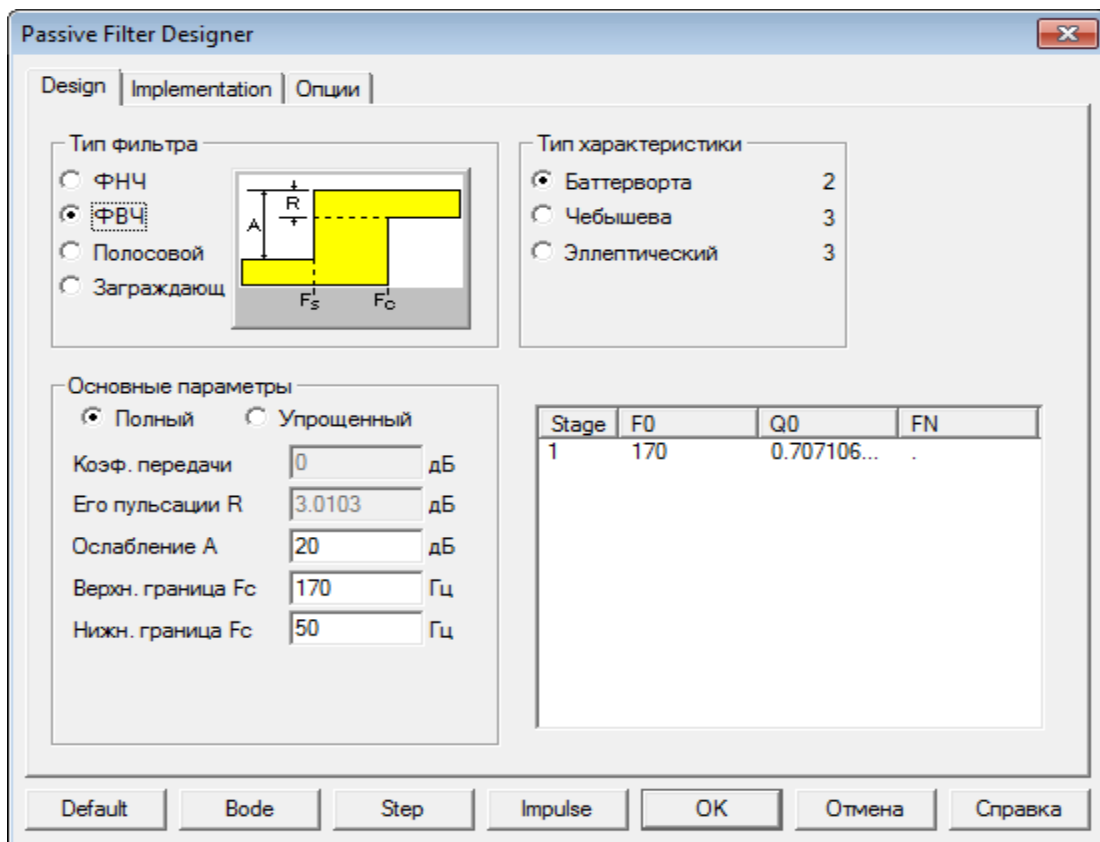


Рис. 3.3.1. Розрахунок фільтра Баттерворта (1-ша частина).

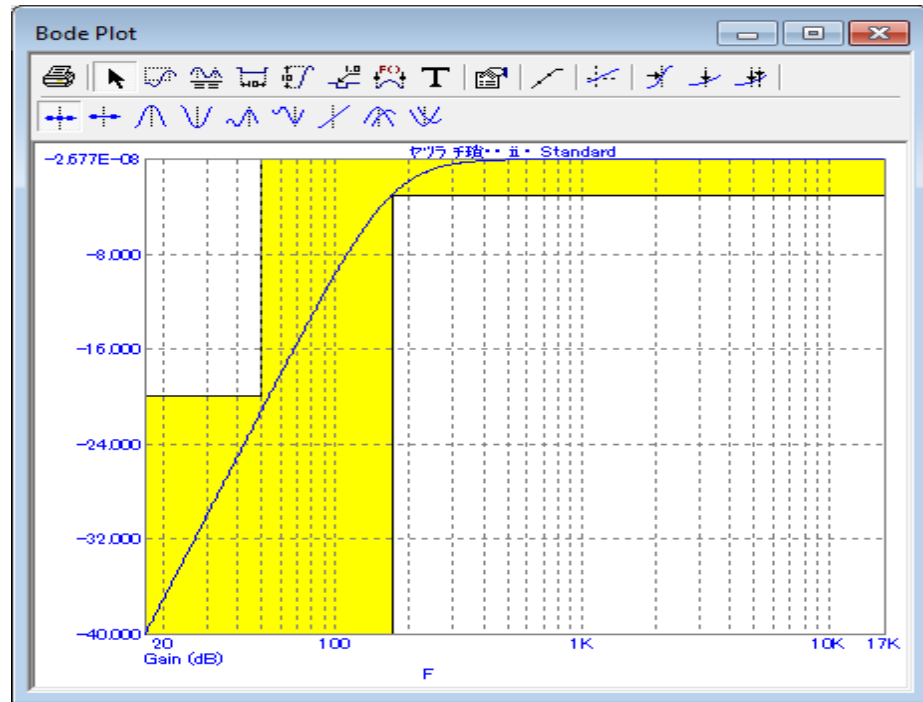


Рис. 3.3.2. Розрахунок фільтра Баттерворта (2-га частина).

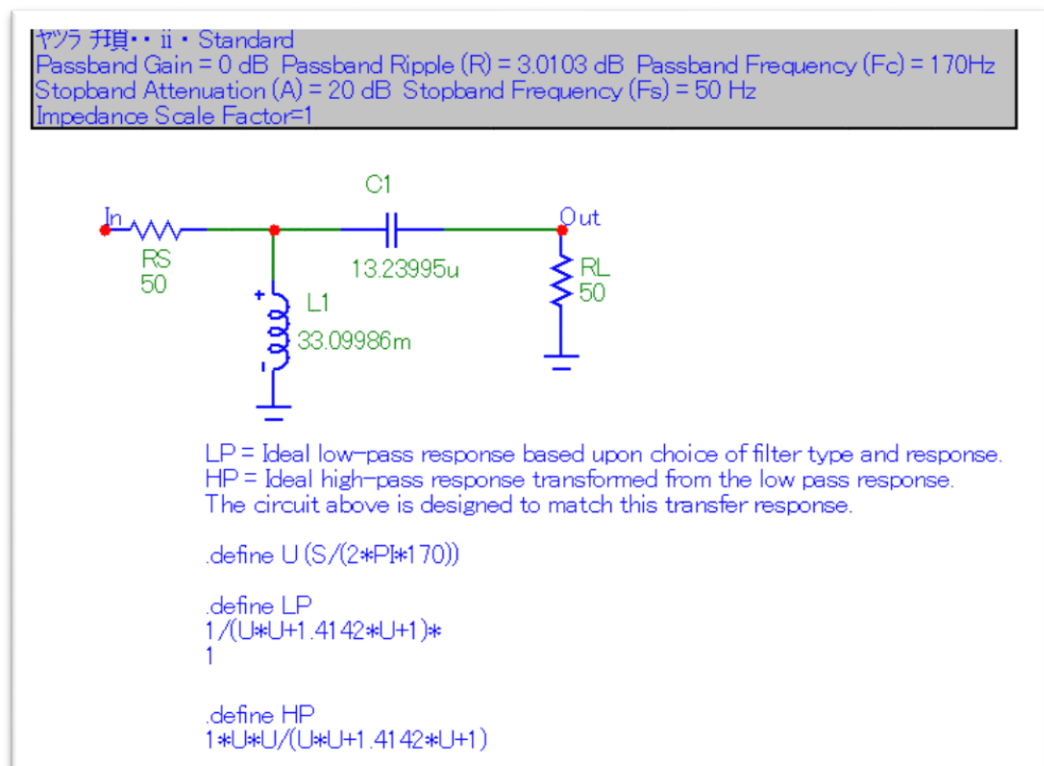


Рис. 3.3.3. Розрахунок фільтра Баттерворта (3-тя частина).

Розмістимо розрахований фільтр в SPICE-моделі схем реєстрації часткових розрядів. Схема реєстрації являє собою об'єкт випробувань, з'єднувальний конденсатор, нелінійний датчик (запропоновано в [1]), пасивний фільтр, підсилювач, кабельна лінія, осцилограф.

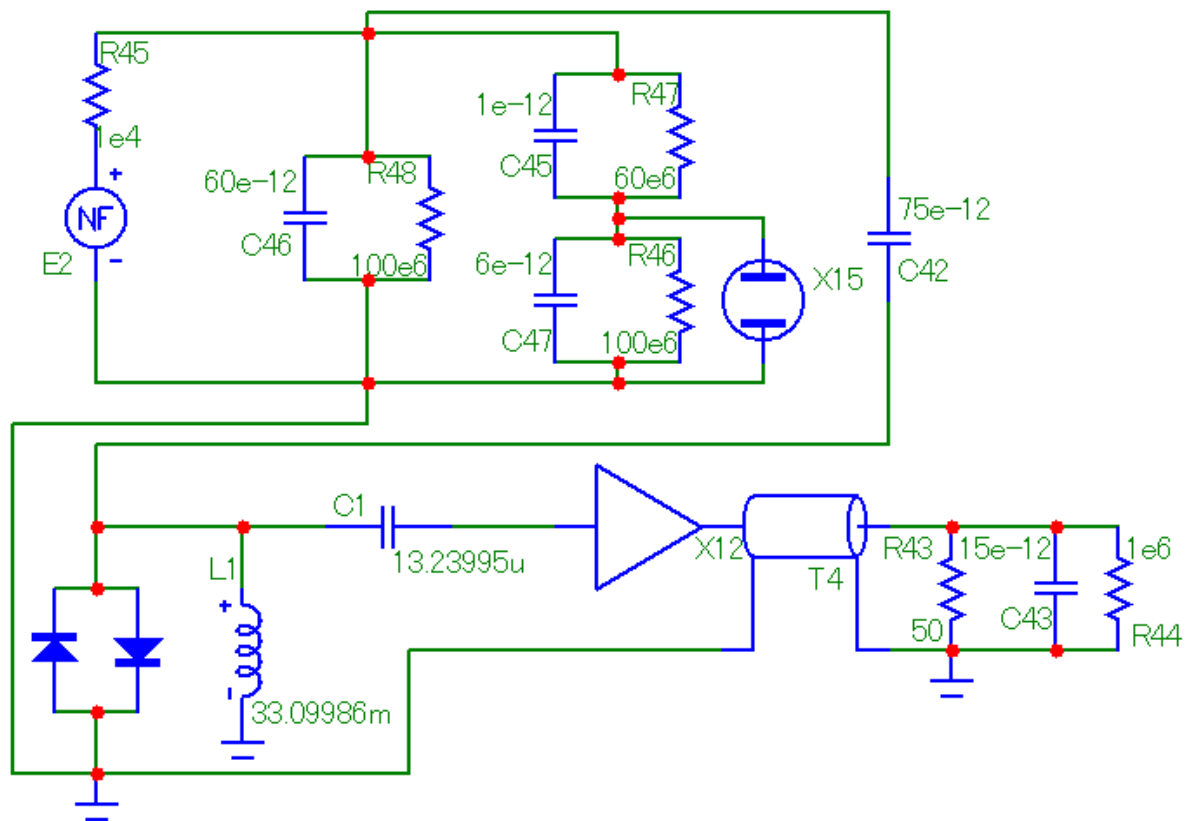


Рис. 3.4. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора.

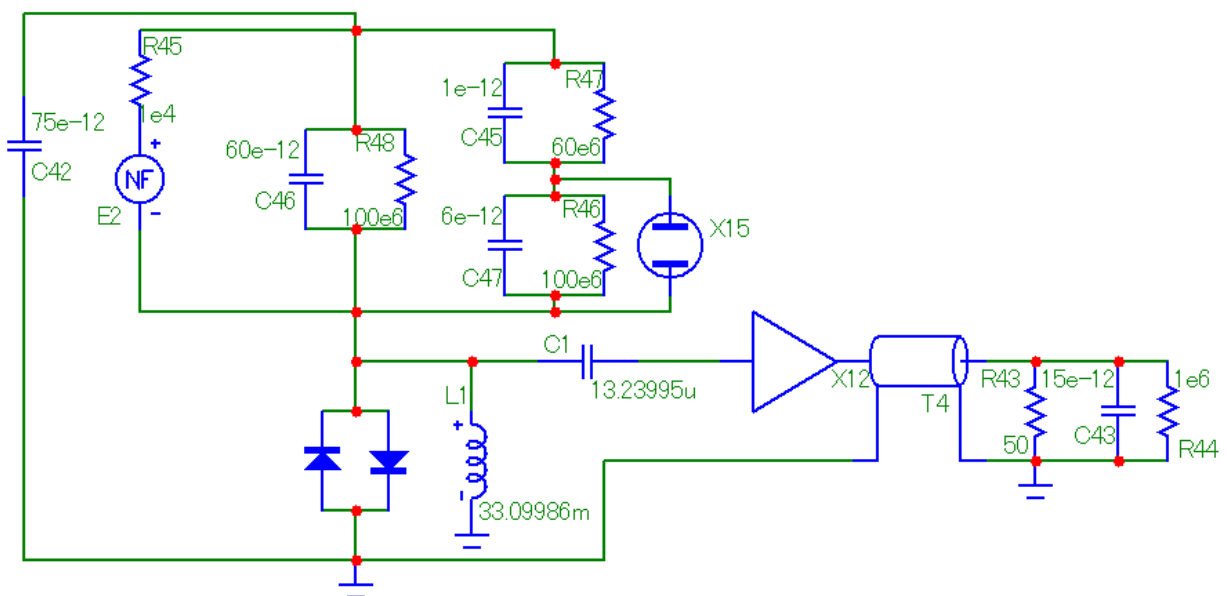


Рис. 3.5. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

Проведемо розрахунок фільтра Чебишева для обох схем реєстрації часткових розрядів.

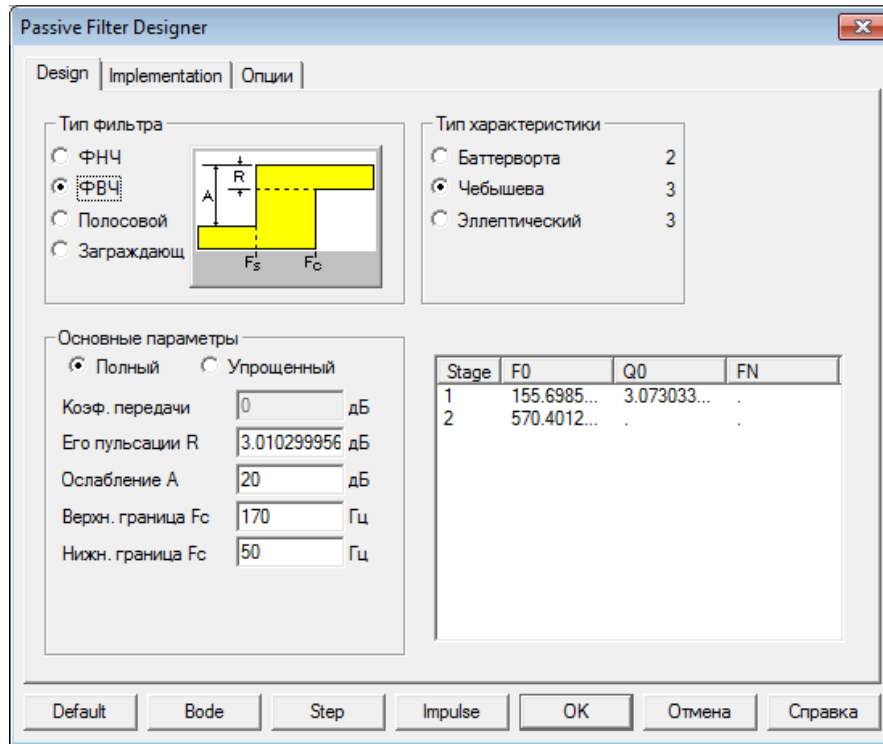


Рис. 3.6.1. Розрахунок фільтра Чебишева (1-ша частина).

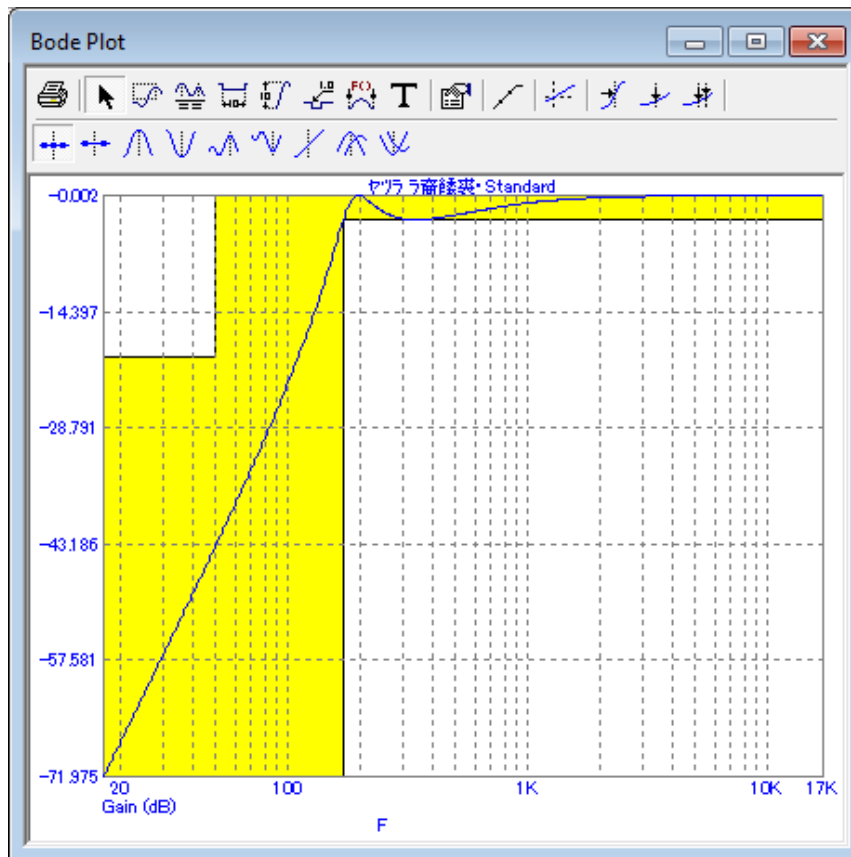


Рис. 3.6.2. Розрахунок фільтра Чебишева (2-га частина).

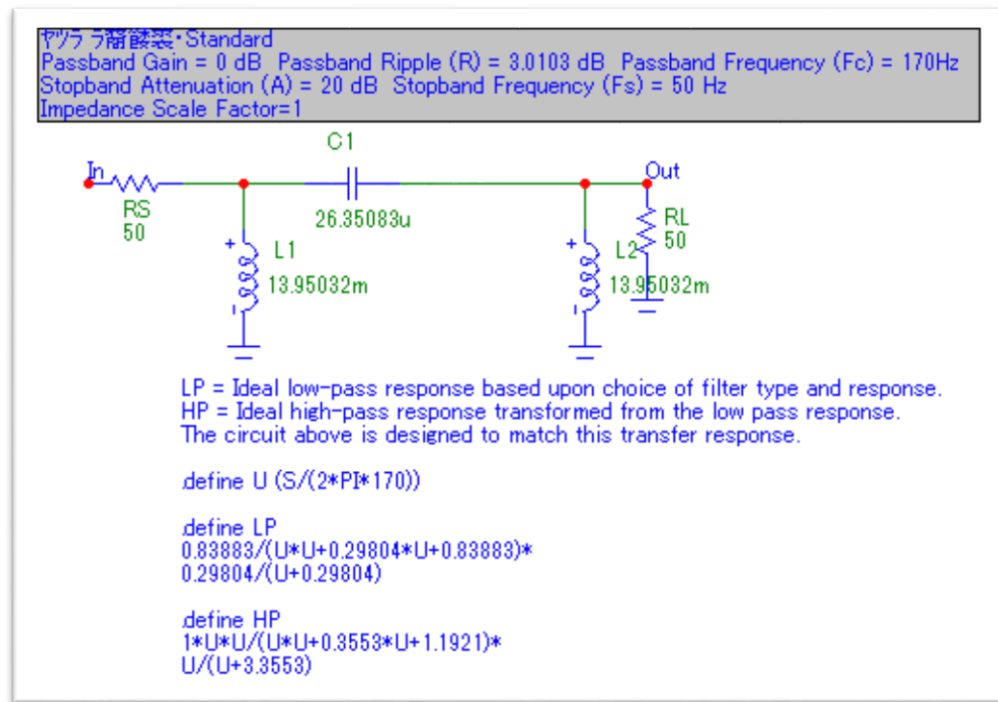


Рис. 3.6.3. Розрахунок фільтра Чебишева (3-тя частина).

Розташуємо розрахований фільтр в SPICE-моделі схем реєстрації часткових розрядів

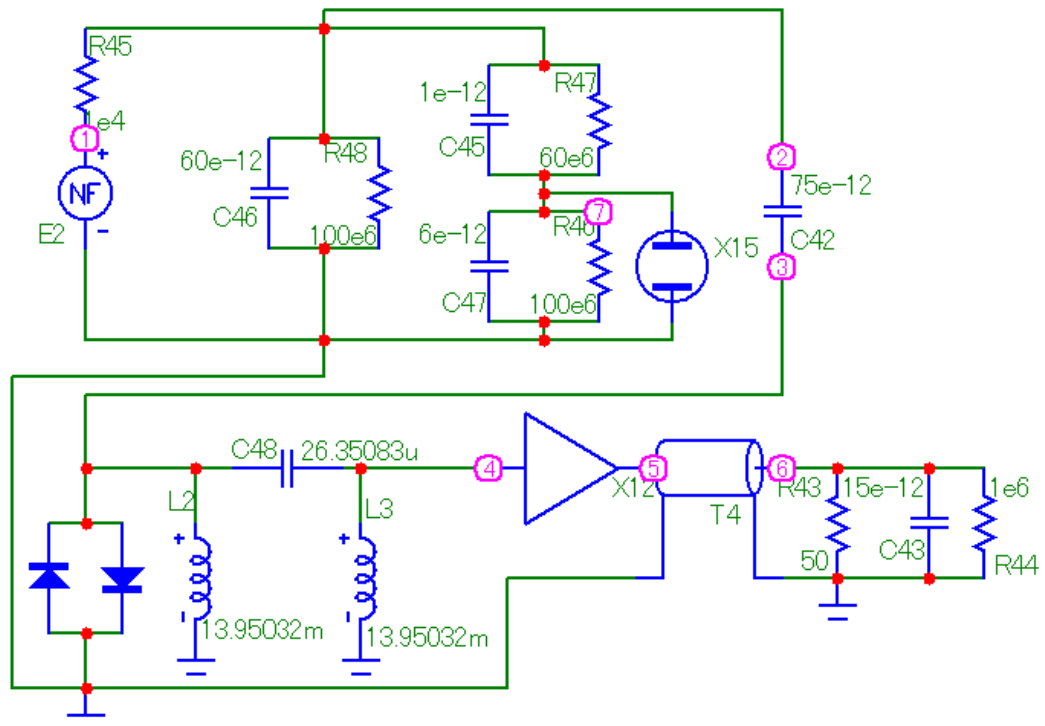


Рис. 3.7. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора.

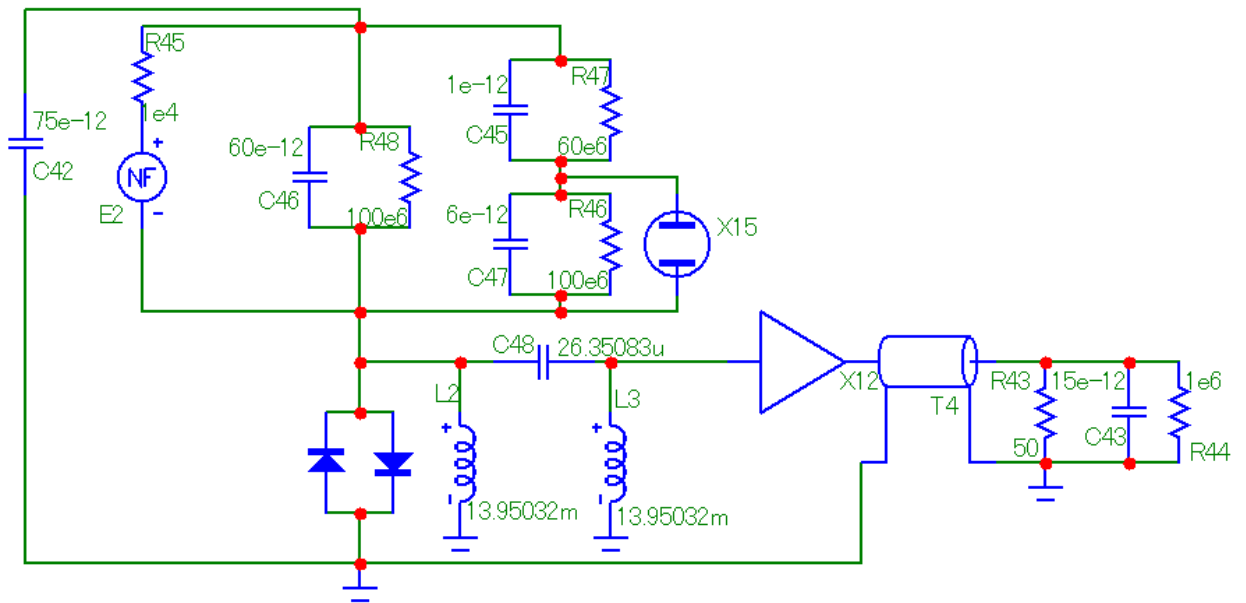


Рис. 3.8. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

Розрахуємо Еліптичний фільтр для схем реєстрації часткових розрядів.

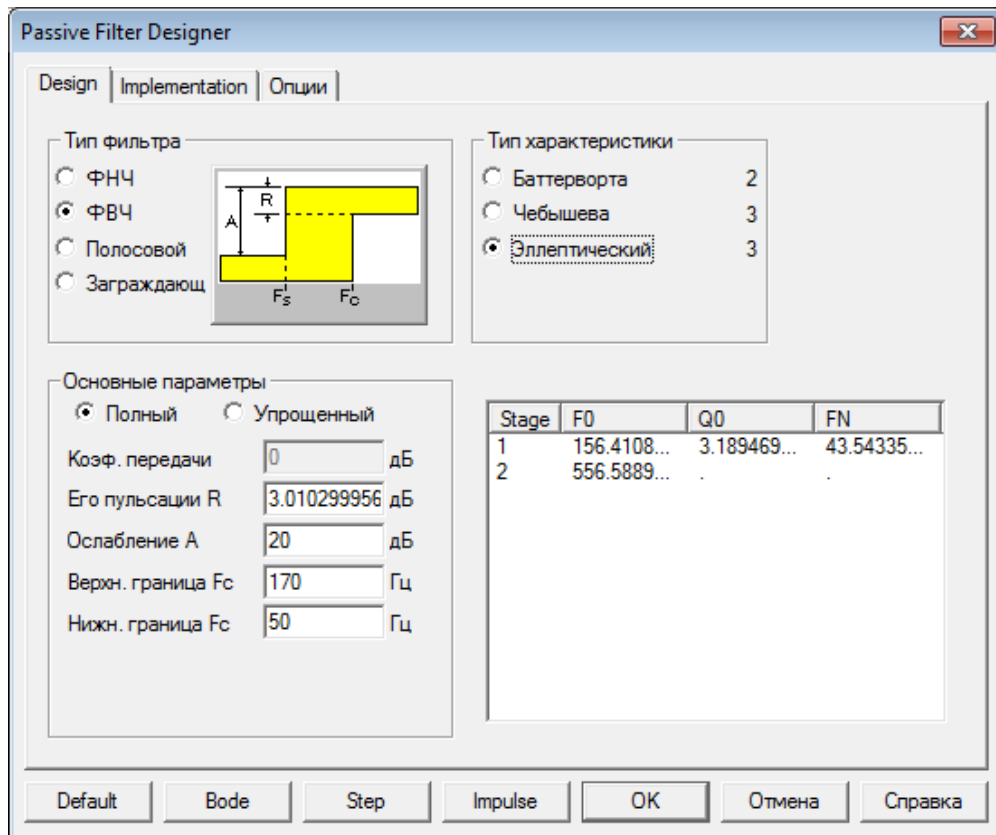


Рис. 3.9.1. Розрахунок Еліптичного фільтра (1-ша частина).

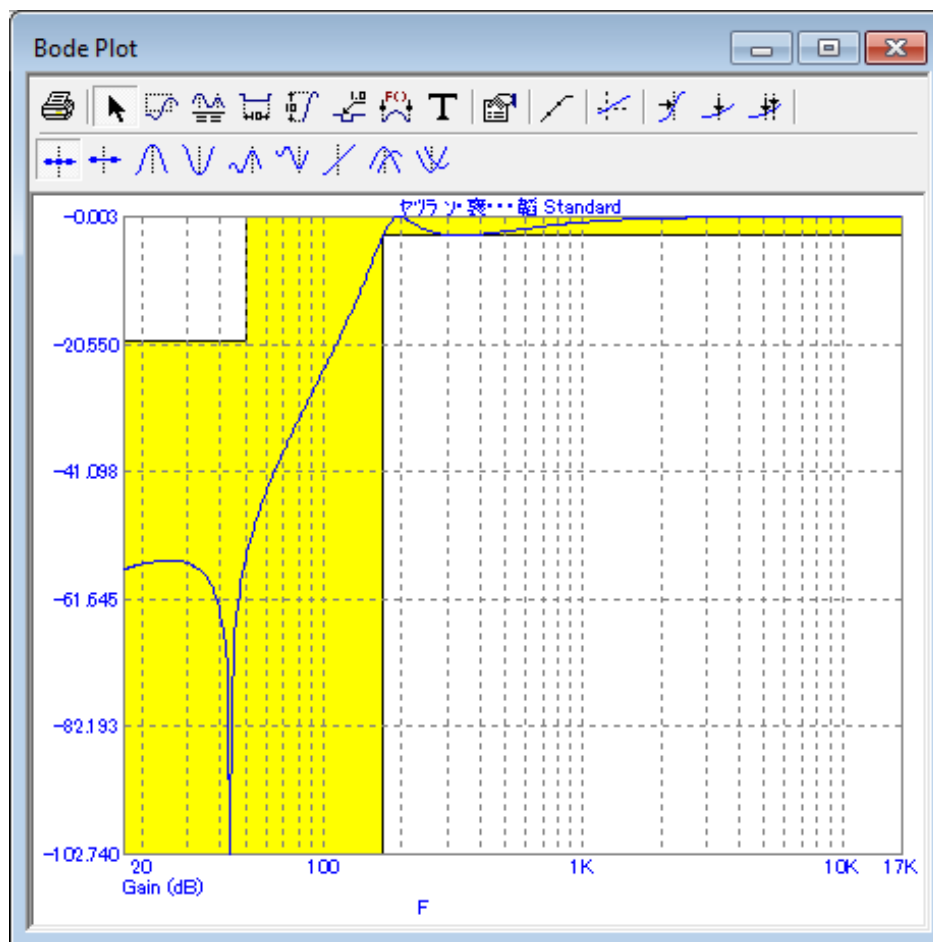


Рис. 3.9.2. Розрахунок Еліптичного фільтра (2-га частина).

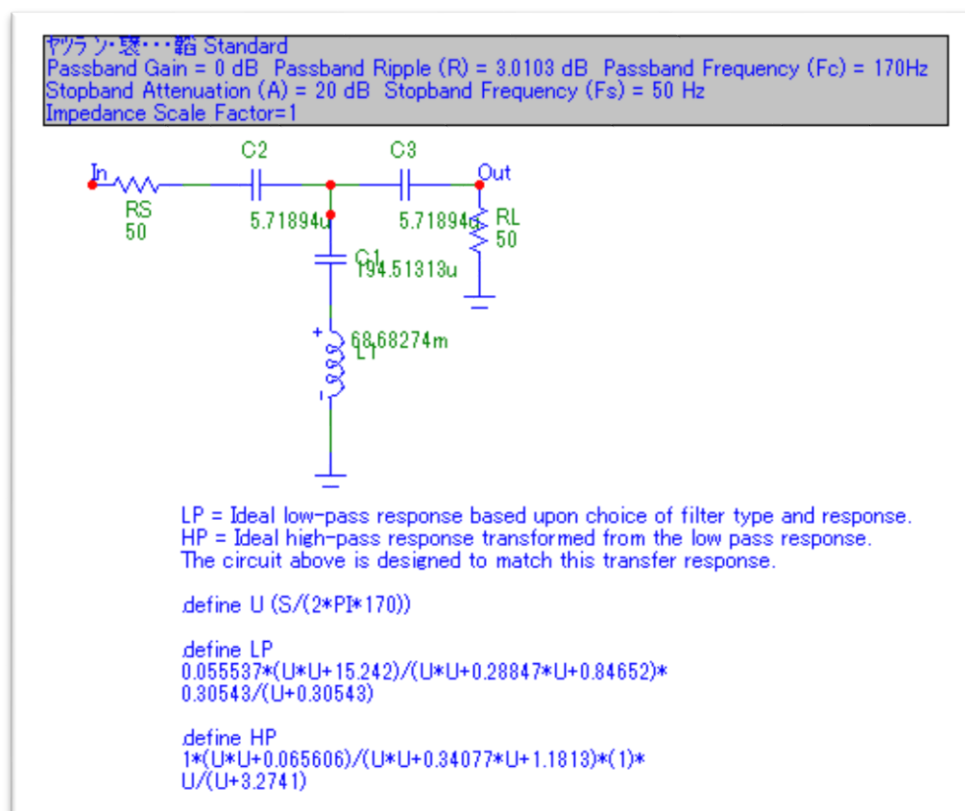


Рис. 3.9.3. Розрахунок Еліптичного фільтра (3-тя частина).

Помістимо розрахований фільтр в SPICE-моделі схем реєстрації часткових розрядів.

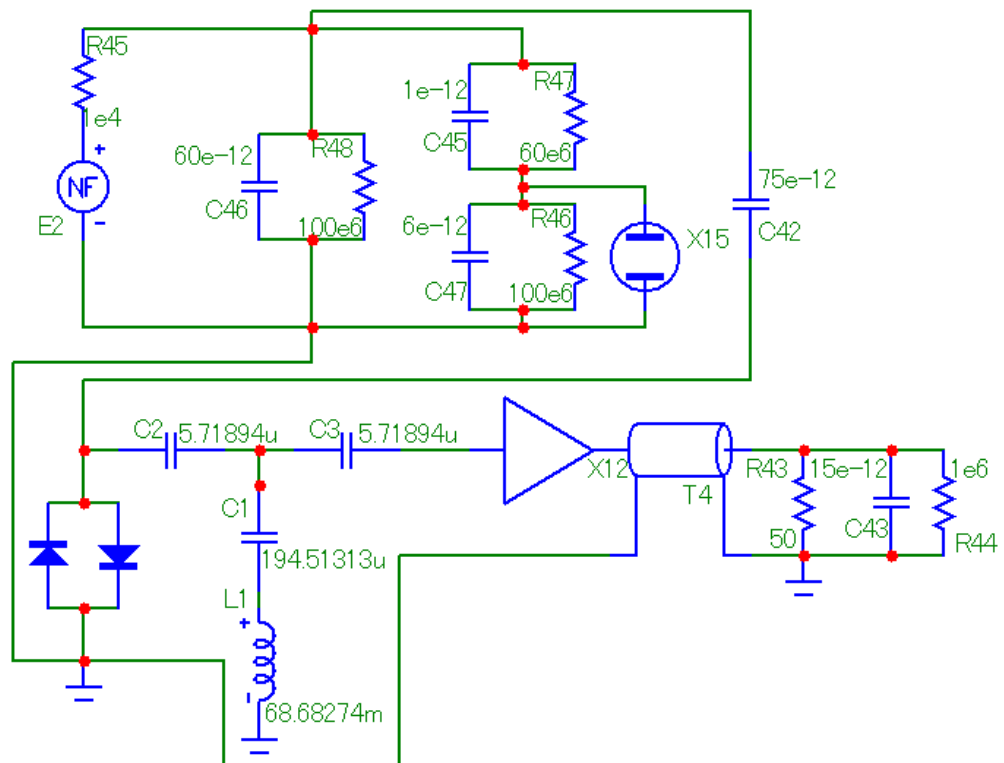


Рис. 3.10.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора.

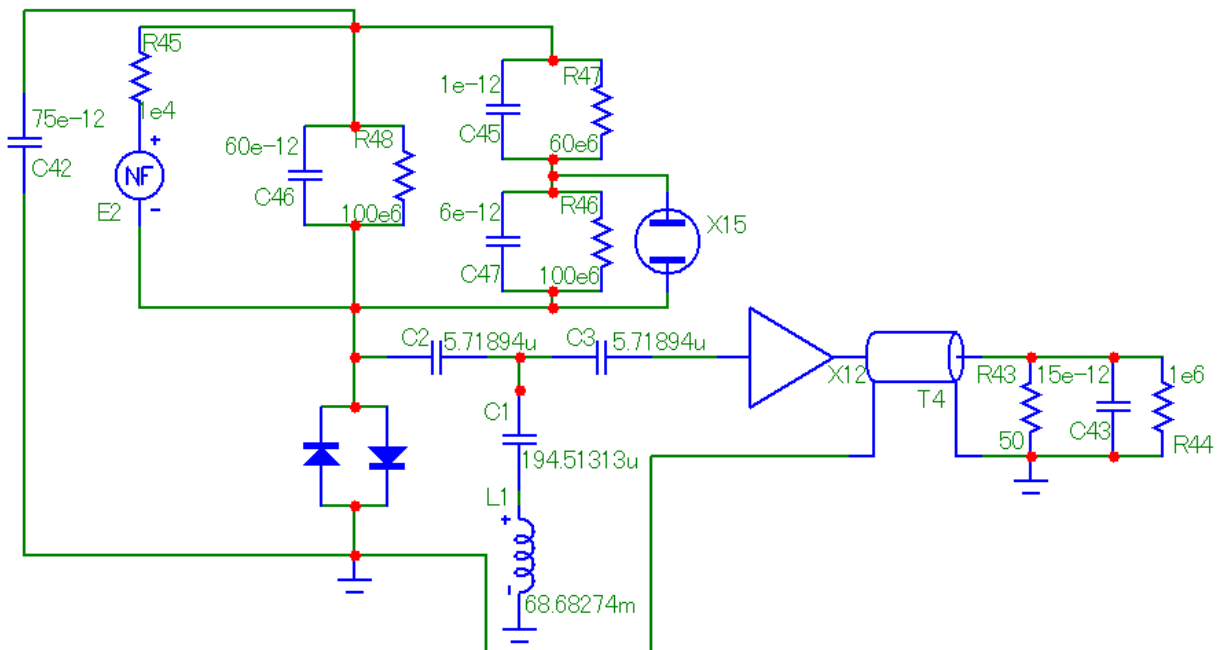


Рис. 3.11.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

Проаналізувавши осцилограми схем реєстрації з застосуванням фільтрів можна сказати, що найкраще показав себе Еліптичний фільтр в обох схемах. Для прикладу наведемо осцилограми цих схем нижче.

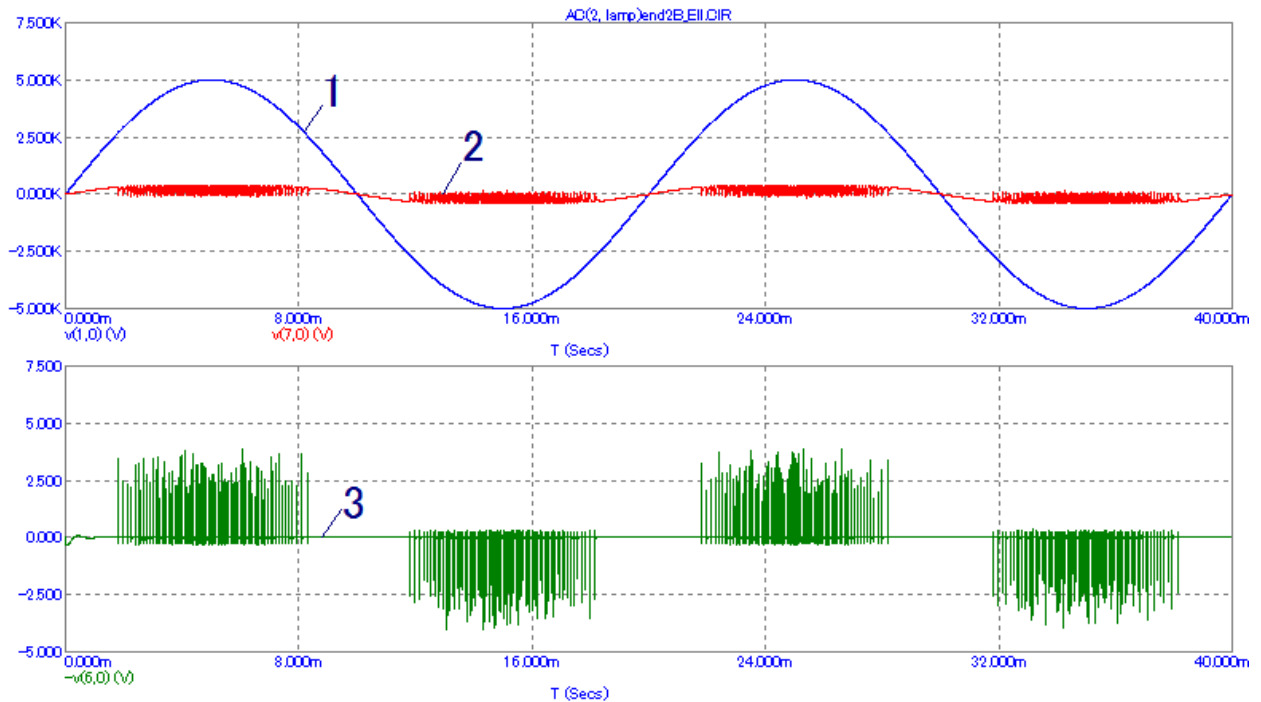


Рис. 3.10.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Еліптичний) (3).

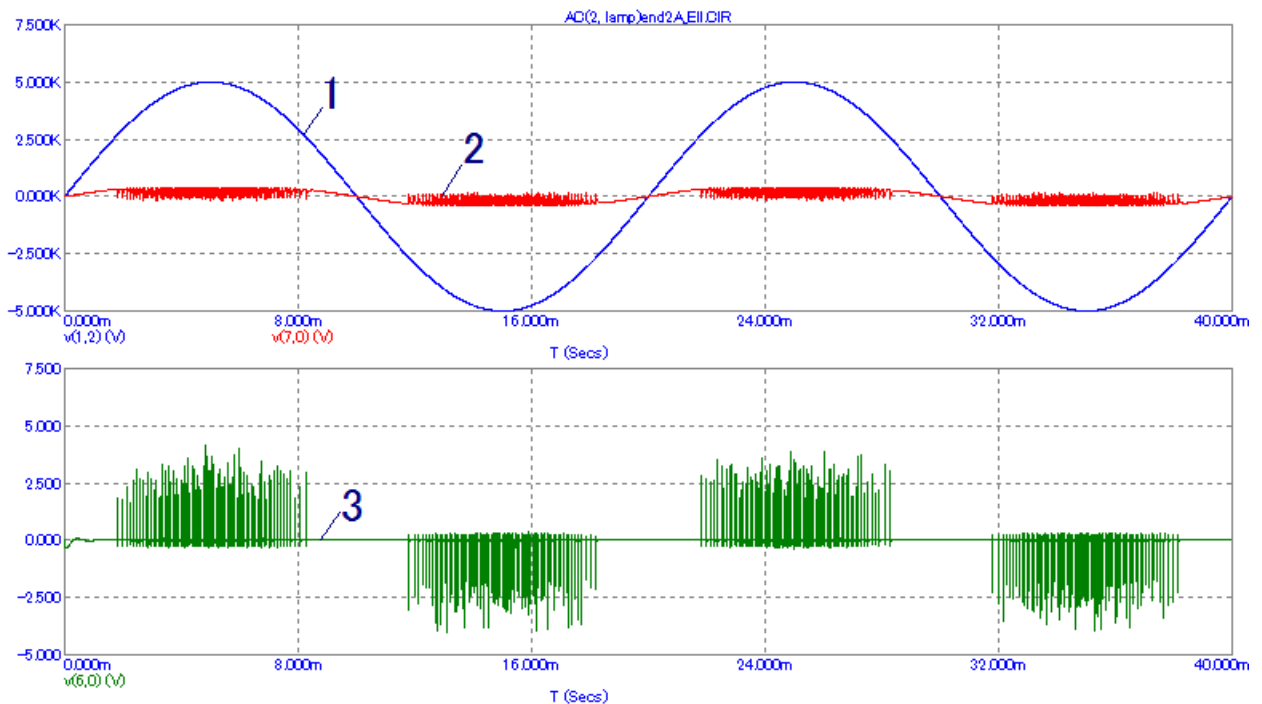


Рис. 3.11.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Еліптичний) (3).

3.3.2. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Постійний струм

Так само як і на змінному, на постійному струмі також з'являється періодична складова, але дуже малої частоти і амплітуди. Виходячи з цього необхідно розрахувати фільтри, як це було зроблено для змінного струму. Розрахуємо ці фільтри знову.

Розрахуємо фільтр Баттерворта для обох схем.

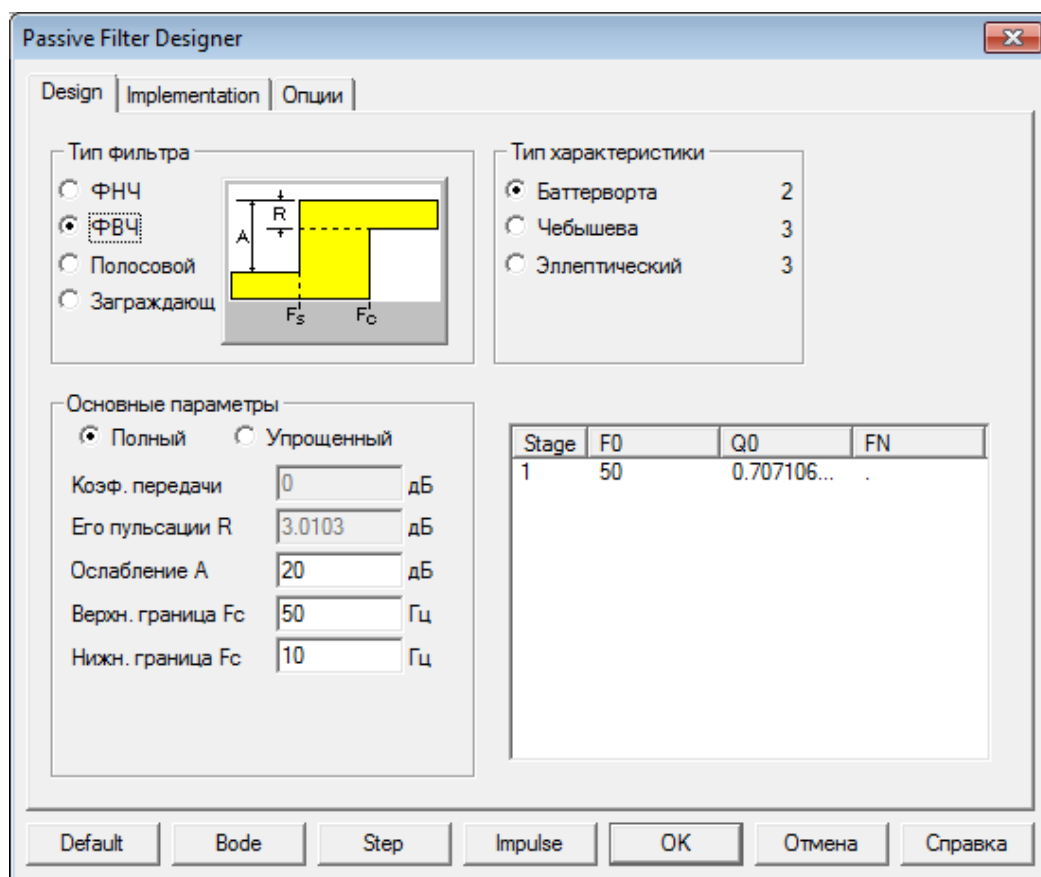


Рис. 3.12.1. Розрахунок фільтра Баттерворта (1-ша частина).

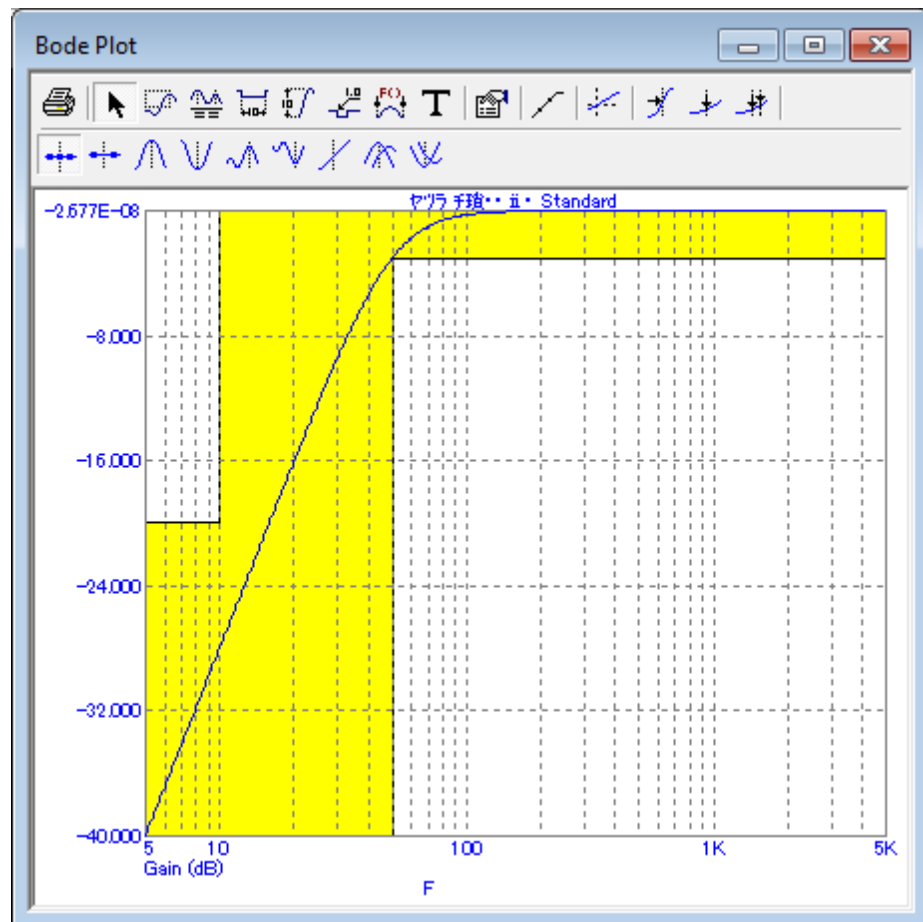


Рис. 3.12.1. Розрахунок фільтра Баттерворта (2-га частина).

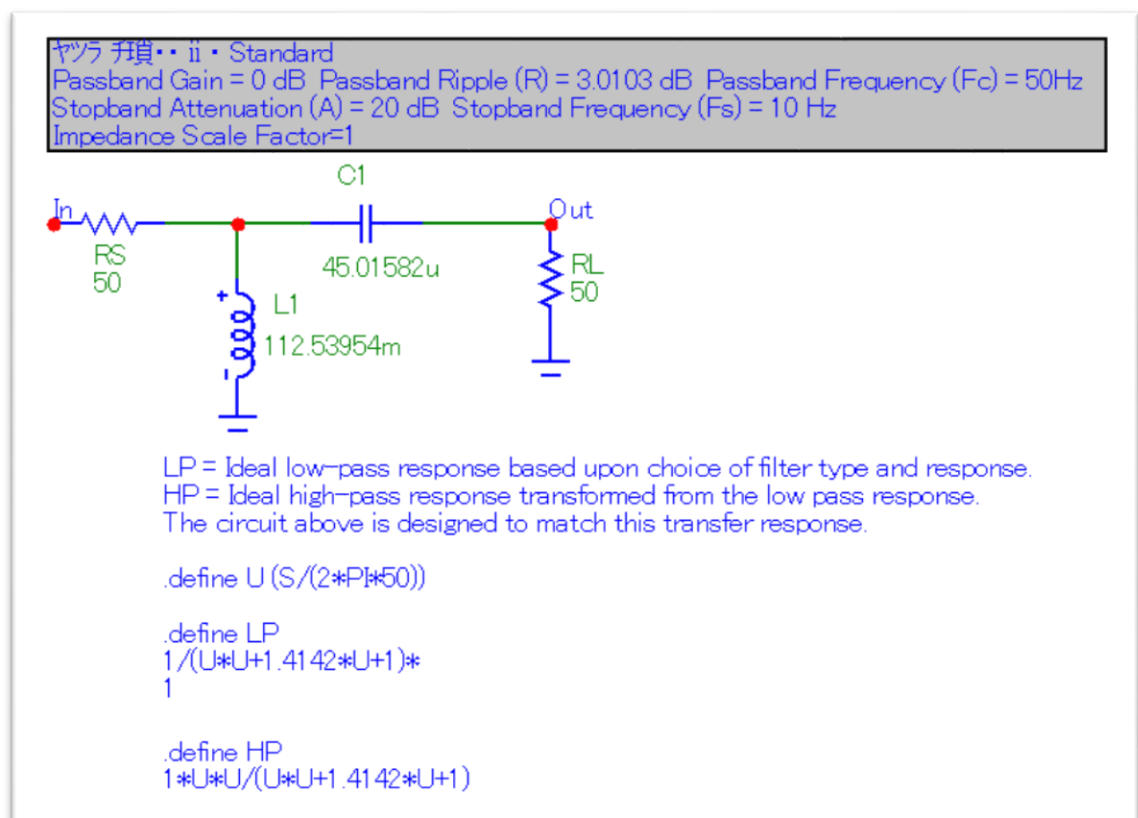


Рис. 3.12.1. Розрахунок фільтра Баттерворта (3-тя частина).

Підставимо розрахований фільтр в SPICE-моделі схем реєстрації часткових розрядів.

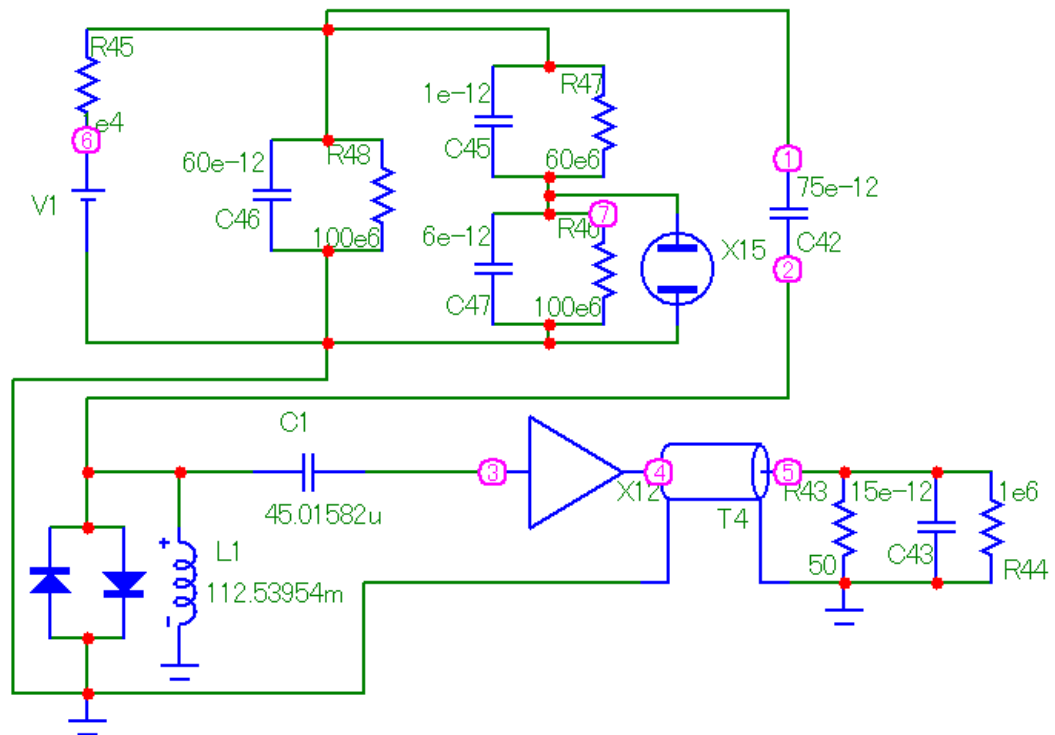


Рис. 3.13.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора.

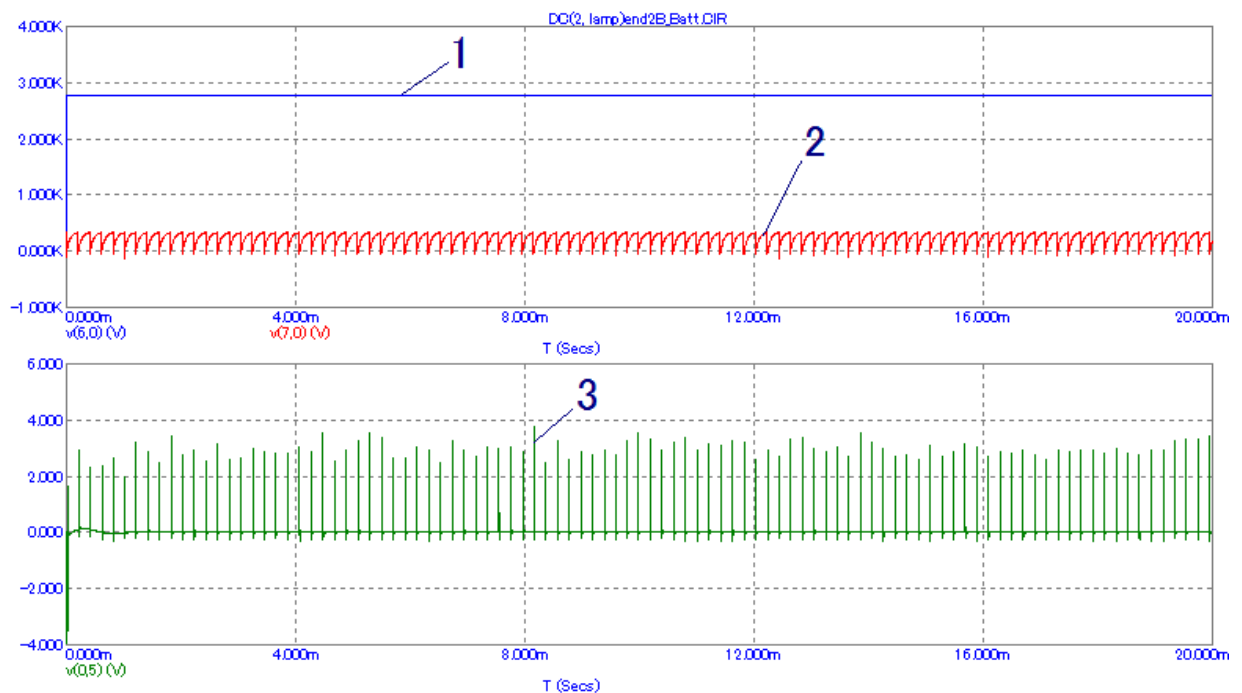


Рис. 3.13.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Баттерворта) (3).

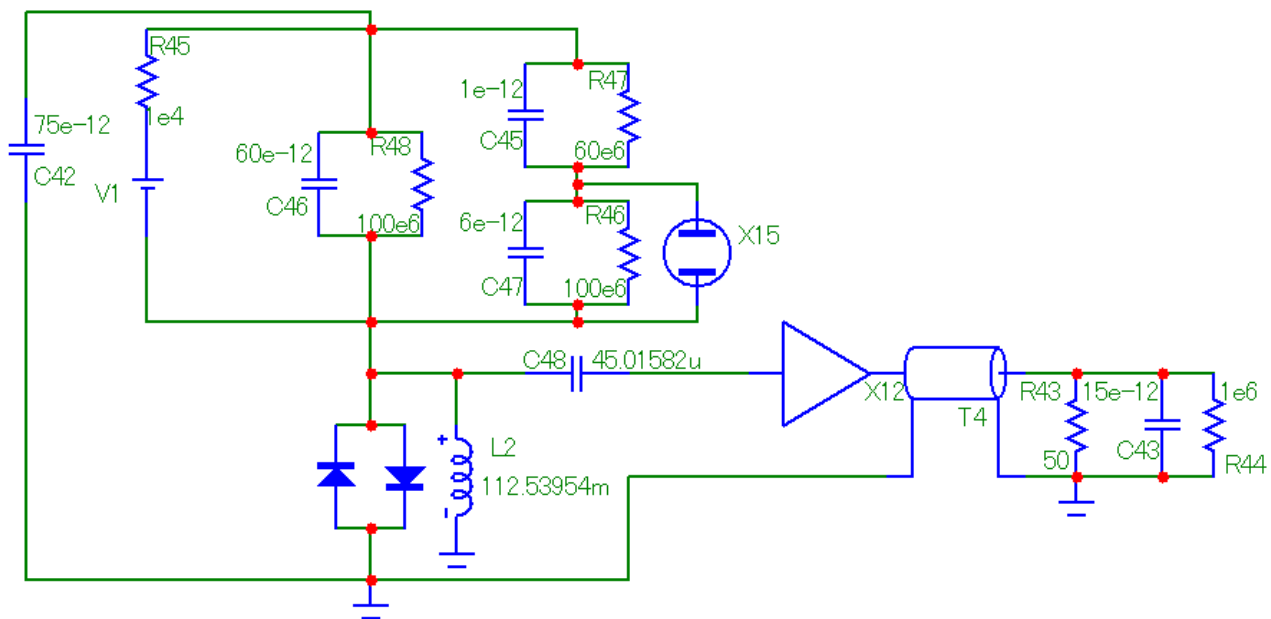


Рис. 3.14.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів.
Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

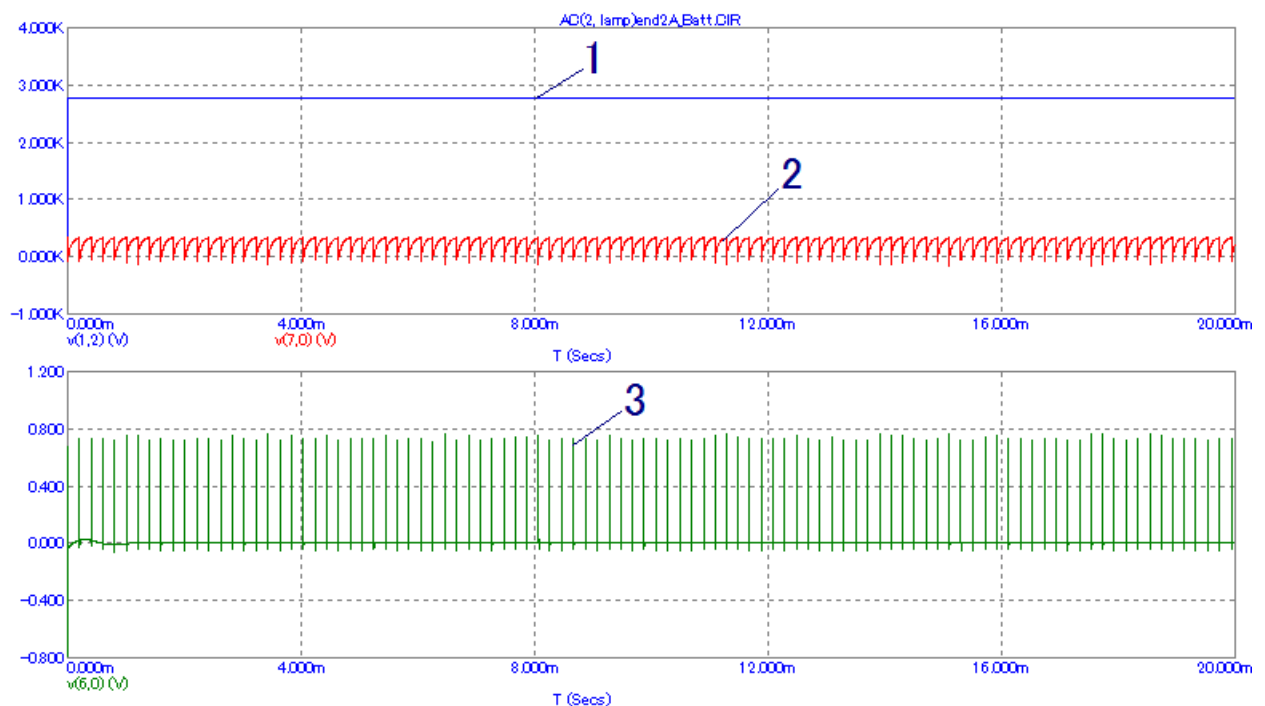


Рис. 3.14.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1),
при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Баттерворта) (3).

Аналогічно розрахуємо фільтр Чебишева для схем реєстрації часткових розрядів.

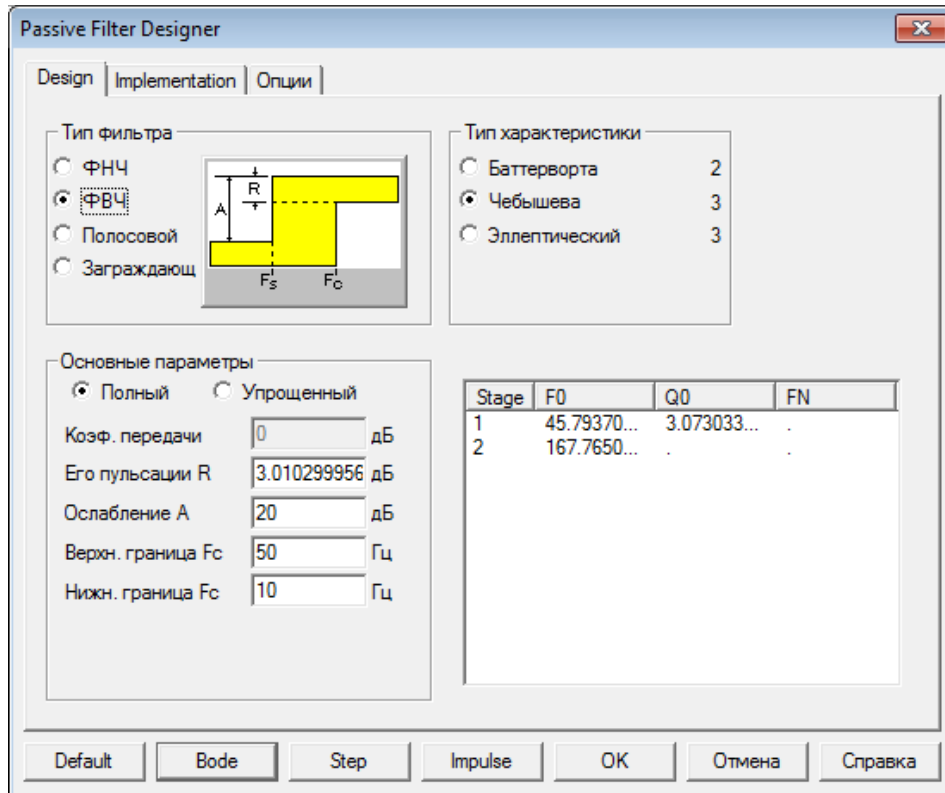


Рис. 3.15.1. Розрахунок фільтра Чебишева (1-ша частина).

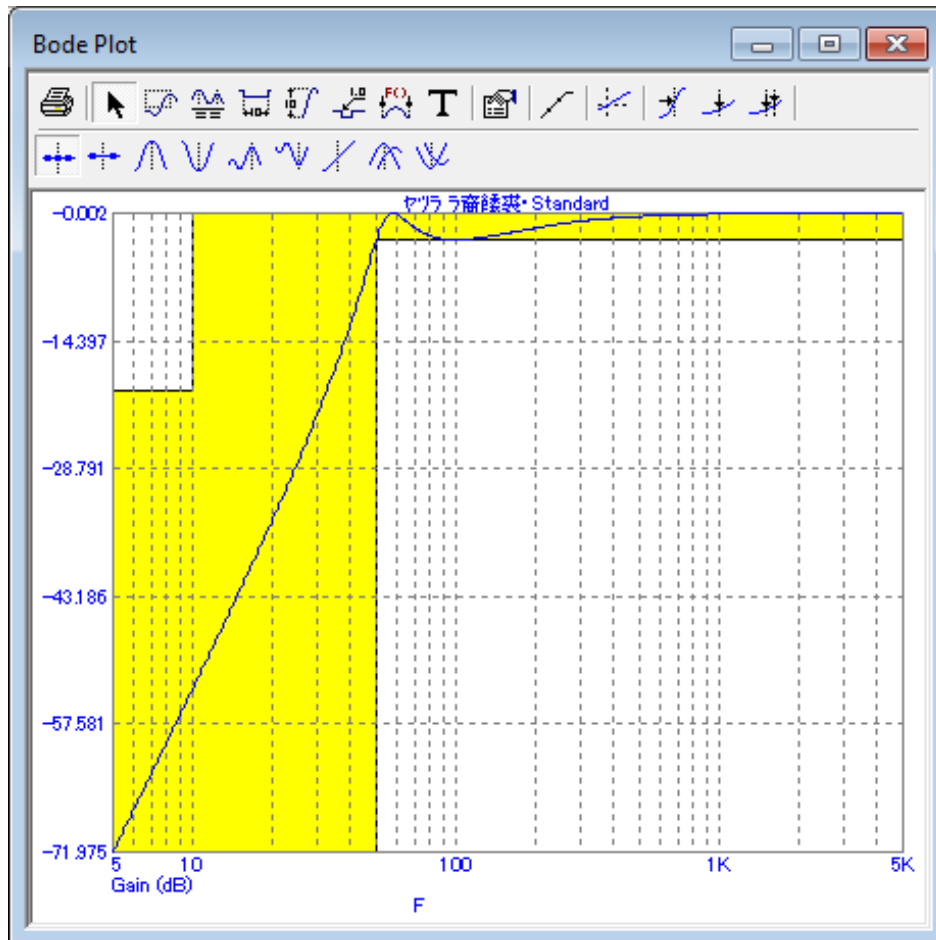


Рис. 3.15.2. Розрахунок фільтра Чебишева (2-га частина).

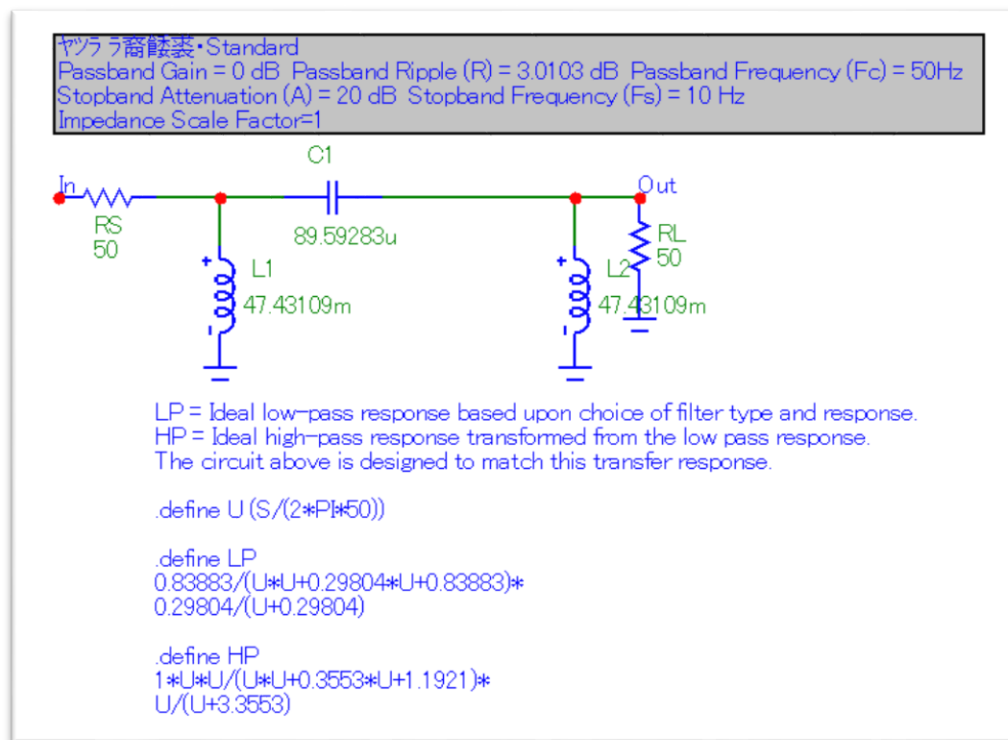


Рис. 3.15.3. Розрахунок фільтра Чебишева (3-тя частина).

Розмістимо фільтр в моделях схем реєстрації.

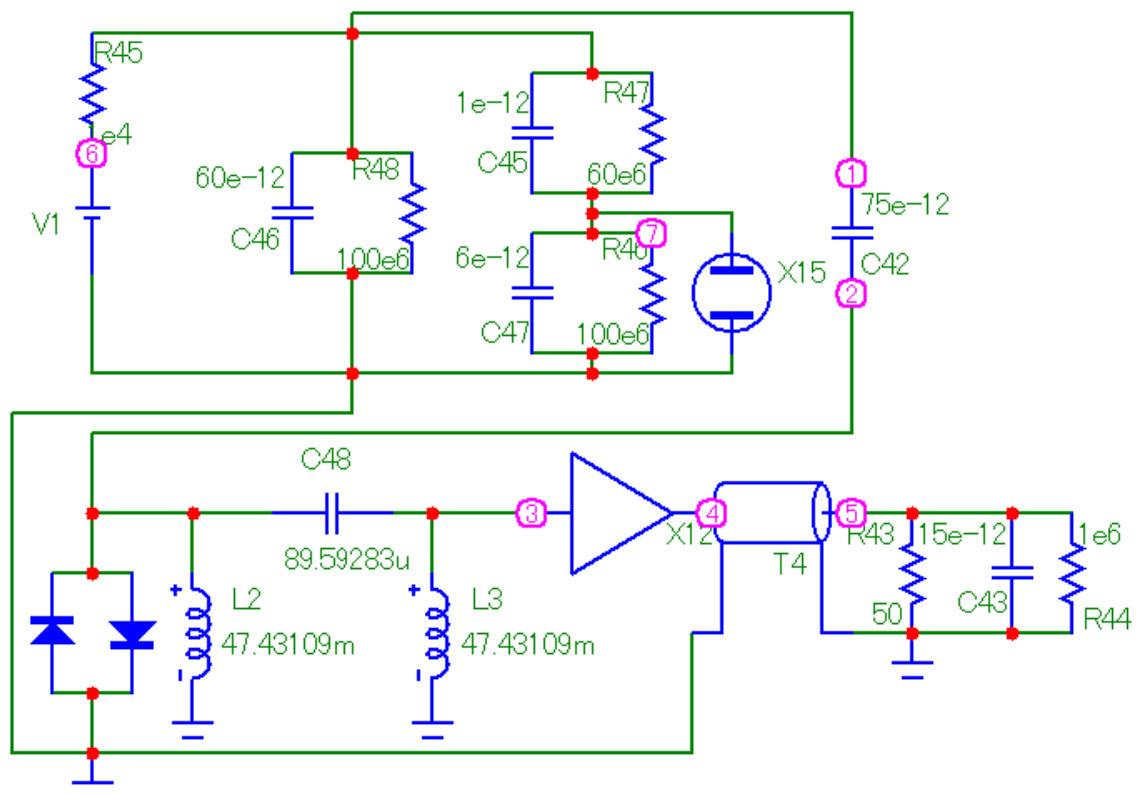


Рис. 3.16.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора.

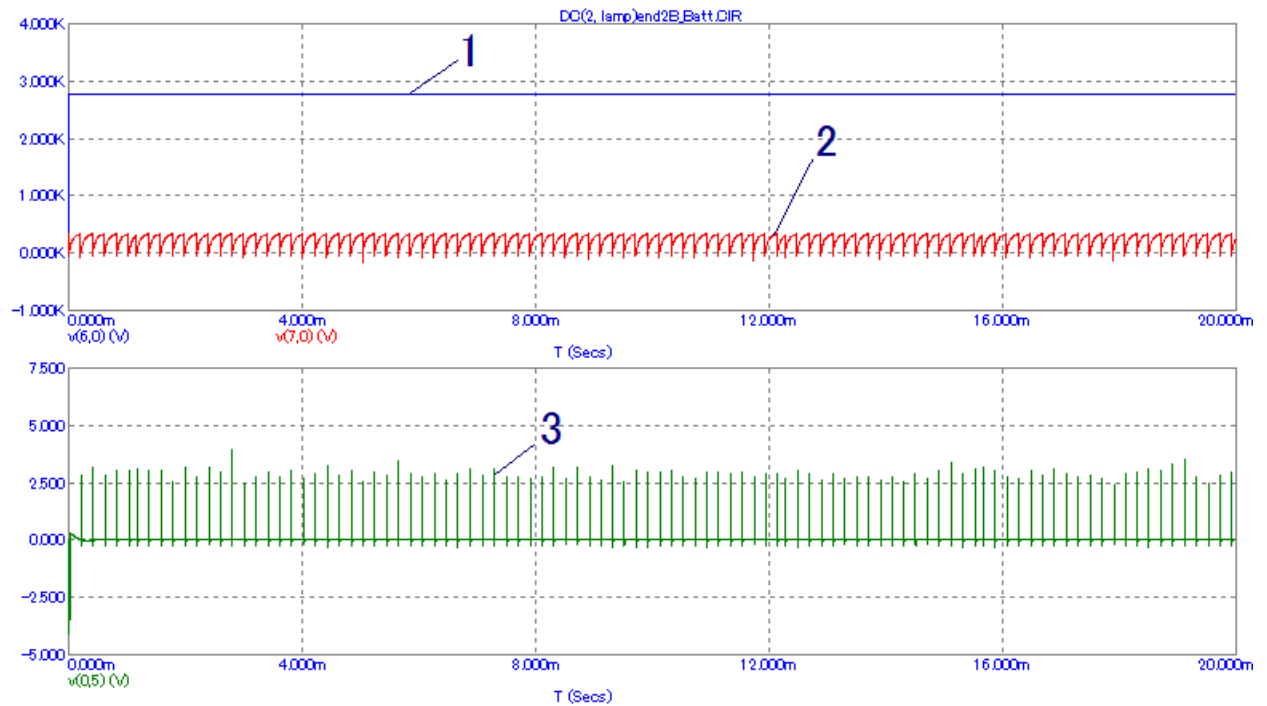


Рис. 3.16.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Чебишева) (3).

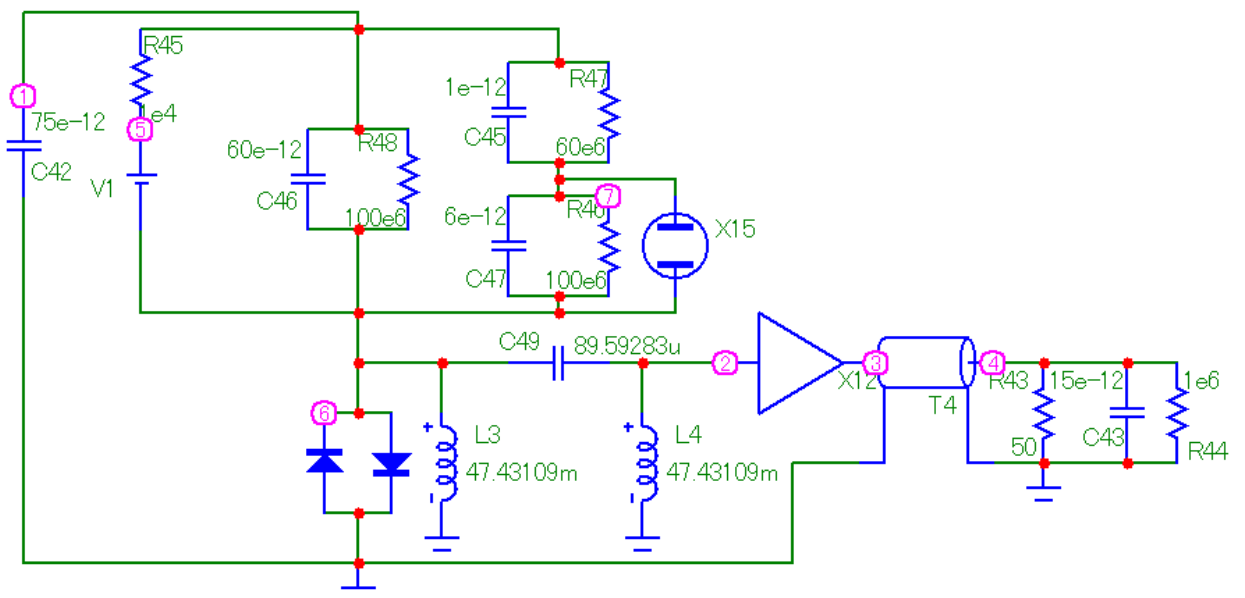


Рис. 3.17.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

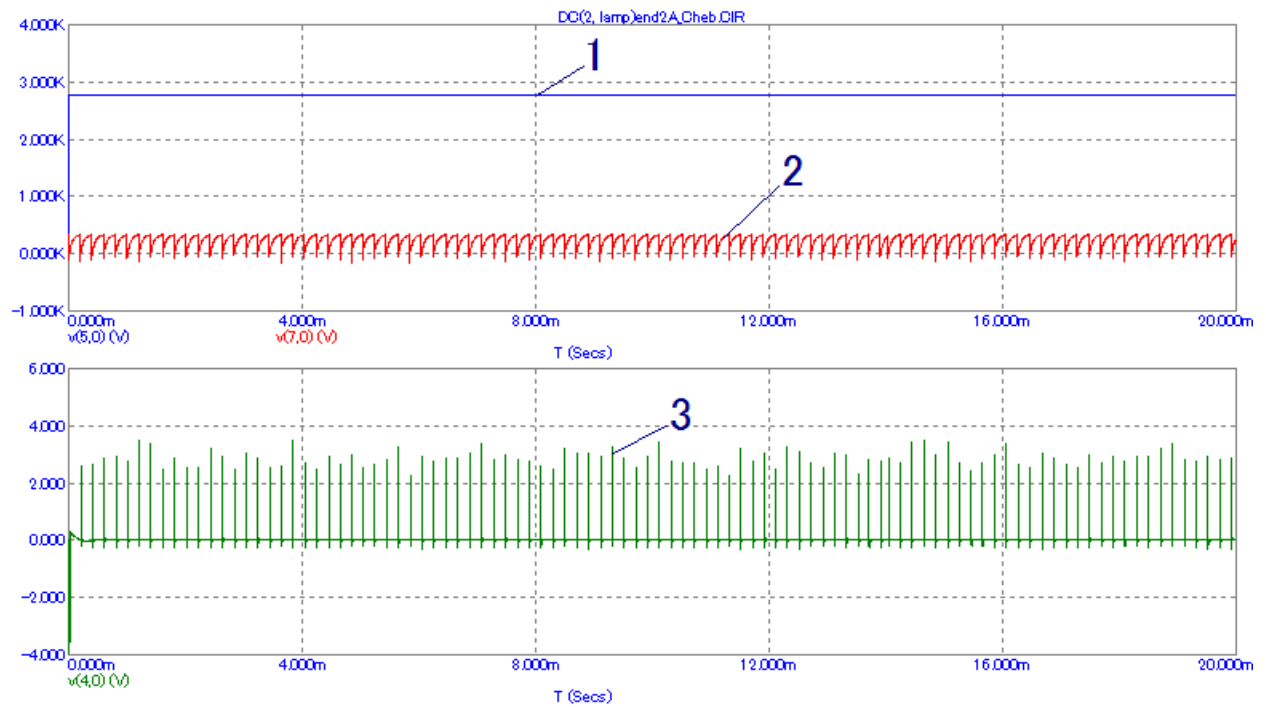


Рис. 3.17.2 Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Чебишева) (3).

Проведемо розрахунок Еліптичного фільтра для схем реєстрації часткових розрядів.

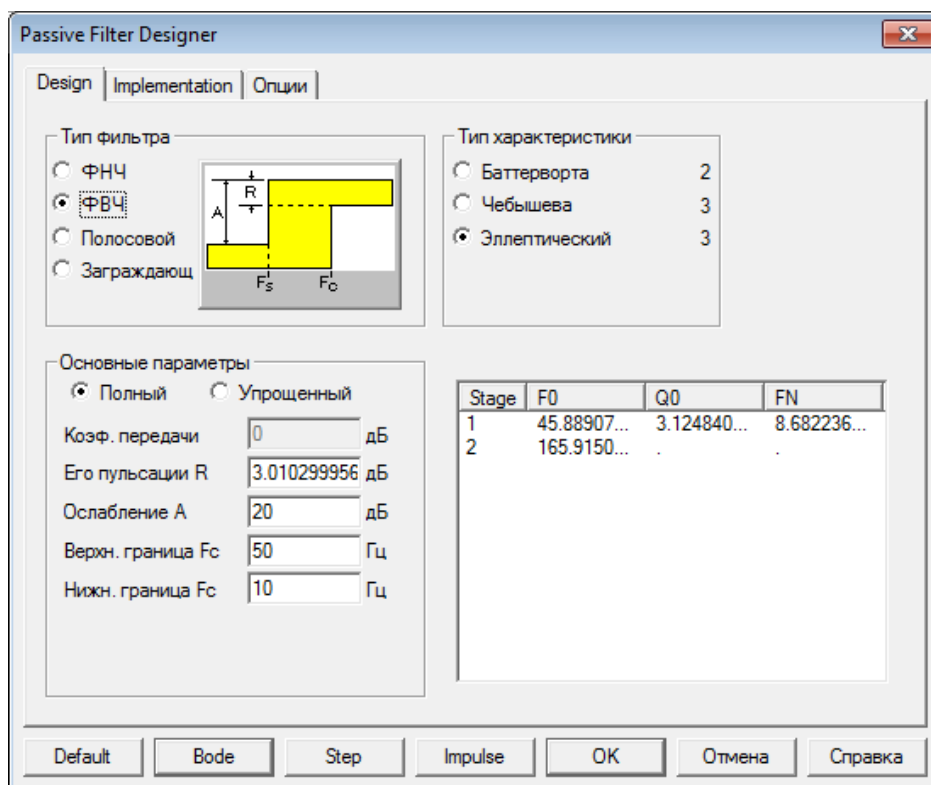


Рис. 3.18.1. Розрахунок Еліптичного фільтра (1-ша частина).

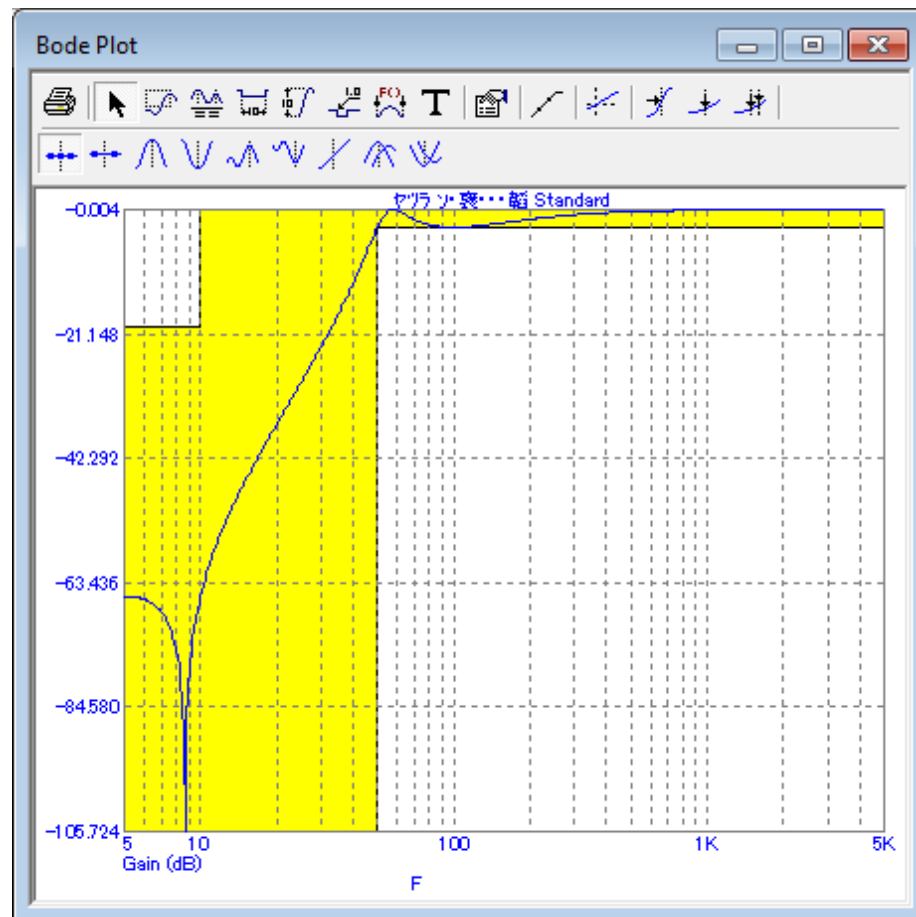


Рис. 3.18.2. Розрахунок Еліптичного фільтра (2-га частина).

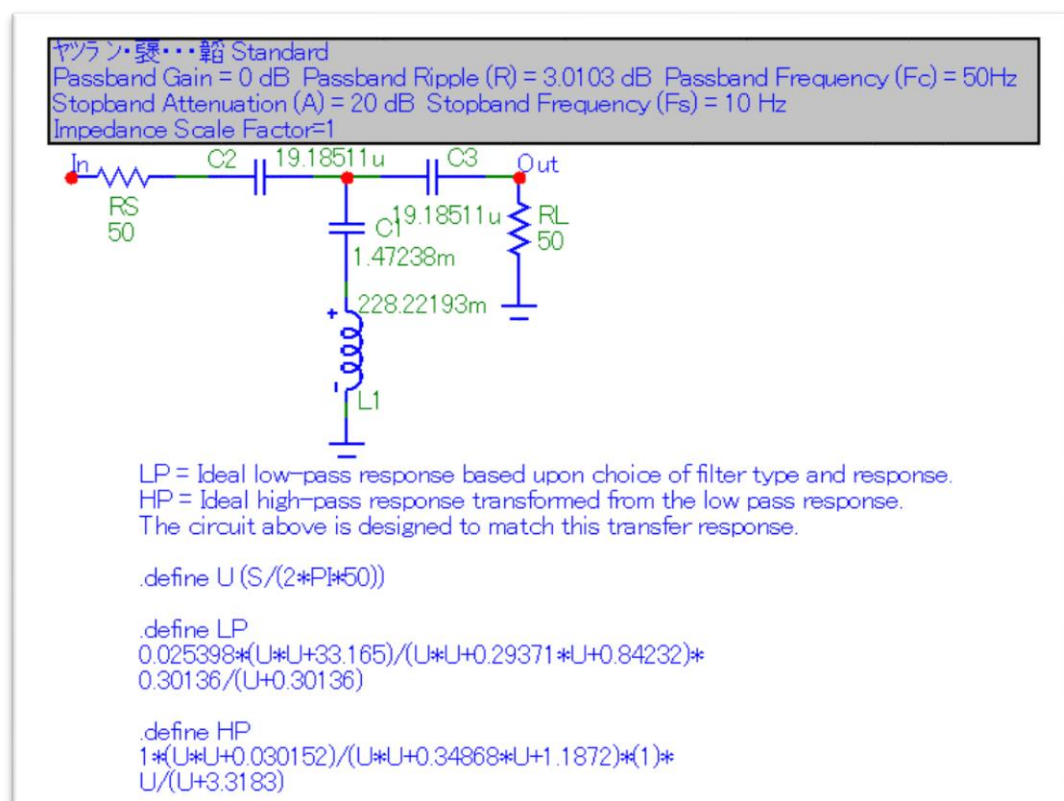


Рис. 3.18.3. Розрахунок Еліптичного фільтра (3-тя частина).

Підставимо Еліптичний фільтр в схеми реєстрації .

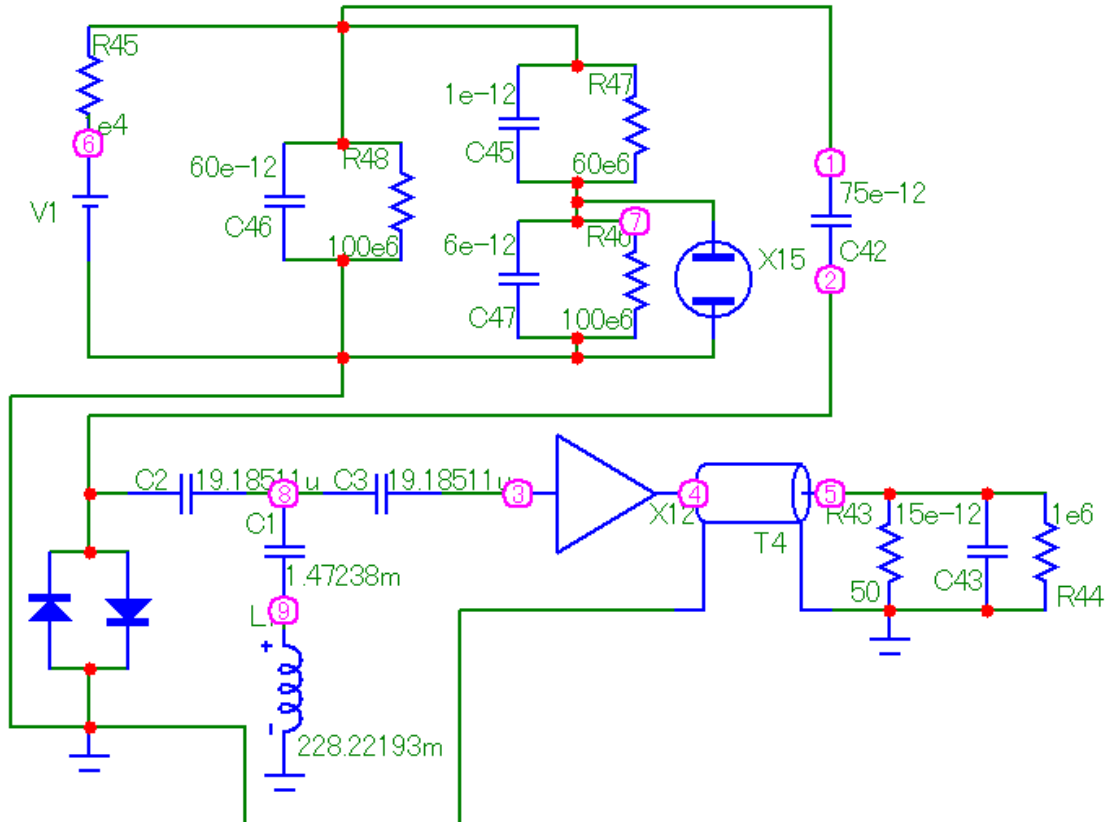


Рис. 3.19.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора

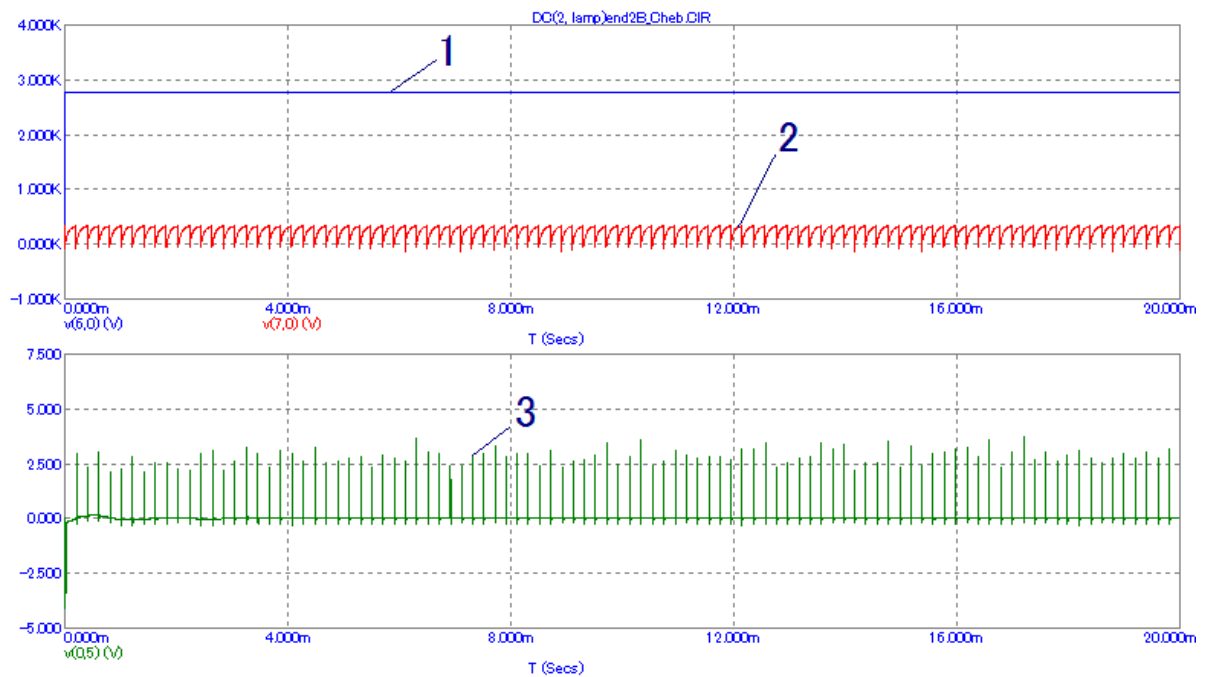


Рис. 3.19.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1), при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Еліптичний) (3).

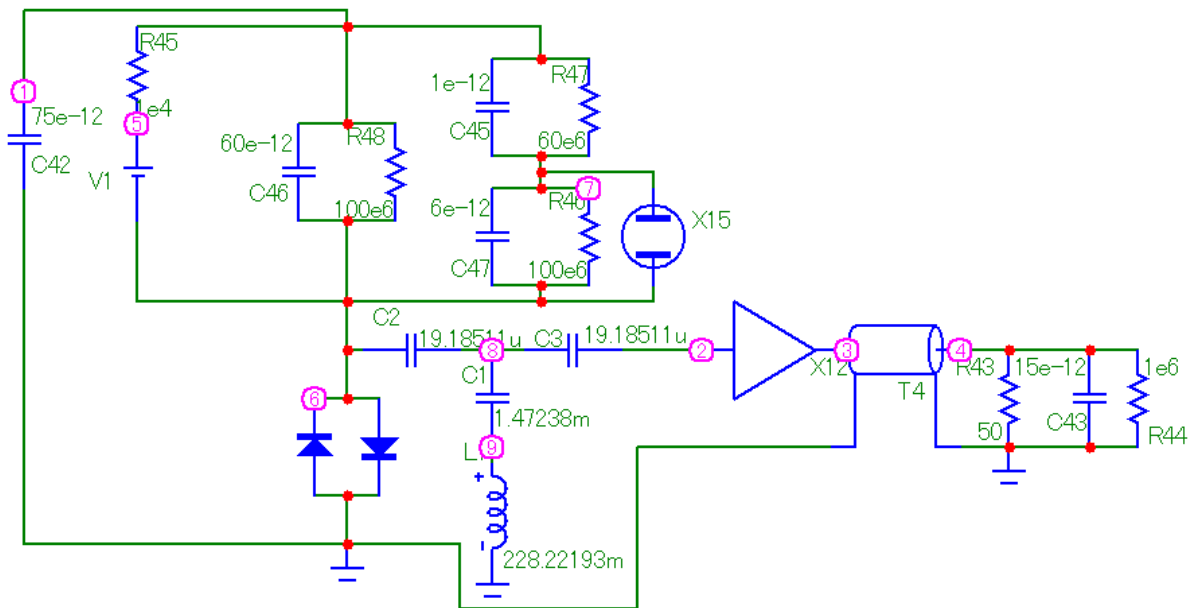


Рис. 3.20.1. SPICE-модель схеми реєстрації часткових розрядів.
Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань.

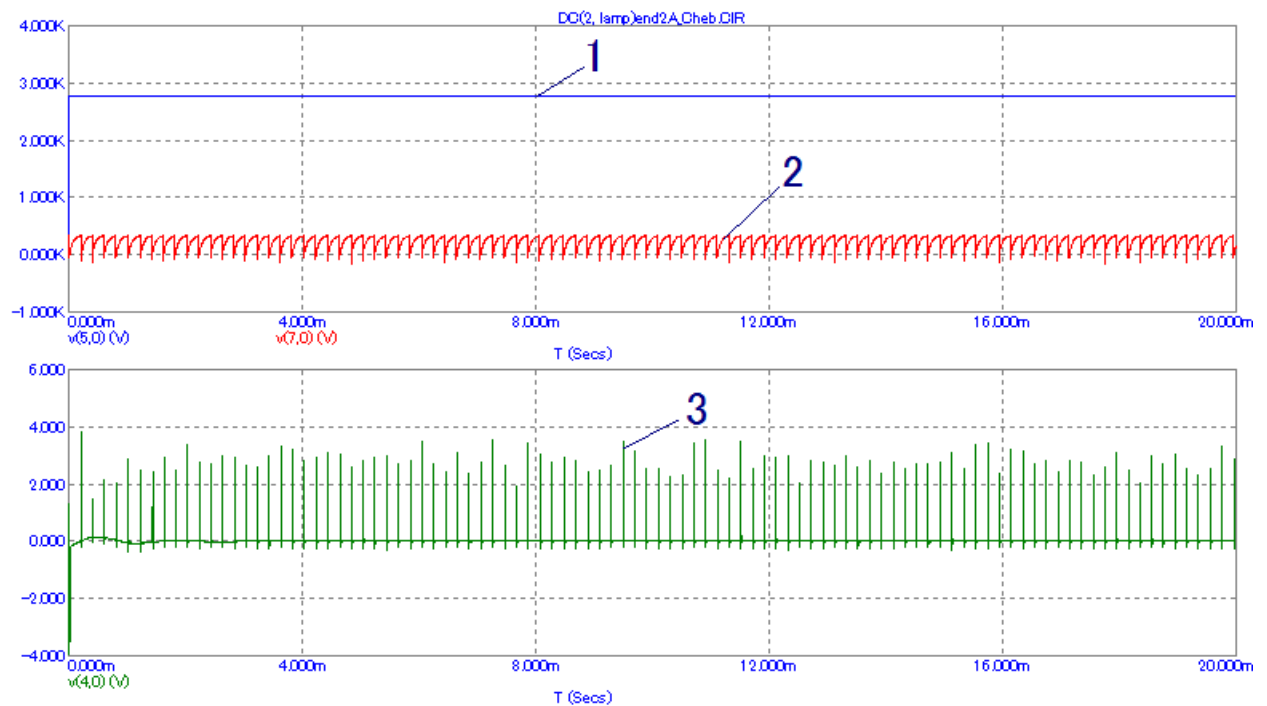


Рис. 3.20.2. Зміна напруги на газовому включенні за відсутності ЧР (1),
при наявності ЧР (2) та з фільтром високої частоти (Еліптичний) (3).

Проаналізувавши осцилограми обох схем для різних фільтрів, не можна однозначно виділити якийсь один з них. Всі фільтри впорались з поставленою задачею.

3.4. Моделювання гірлянд ізоляторів для ЛЕП змінного струму

Виконаємо моделювання гірлянд ізоляторів ЛЕП середньої, високої та надвисокої напруги змінного струму.

Гірлянда ЛЕП складається з: 3 ізоляторів – 35 кВ; 7 ізоляторів – 110 кВ; 10 ізоляторів – 150 кВ; 15 ізоляторів – 220 кВ; 20 ізоляторів – 330 кВ; 25 ізоляторів – 500 кВ; 29 ізоляторів – 750 кВ [5]. Прийmemo в моделюванні, що: ємність ізолятора дорівнює 60 пФ; ємність ізолятора відносно землі – 3 пФ; ємність ізолятора відносно проводу – 0,75 пФ [6]. Згідно [6] вважаємо, що всі ємності відносно землі рівні між собою і всі ємності відносно проводу рівні відповідно. Опір неушкодженого незабрудненого ізолятора прийнято 100 МОм. Опір чистого повітря між ізолятором і опорою, а також між ізолятором і проводом прийнято рівним 1 ПОм. Варіації цих опорів потрібні в моделюванні схеми заміщення для імітування забрудненого повітря та забрудненої поверхні ізолятора.

Моделювання проводимо для пошкодженої та непошкодженої гірлянд.

SPICE-модель схеми заміщення наводимо лише для гірлянди з дефектним ізолятором, оскільки вони відрізняються лише відсутністю та наявністю дефектного ізолятора. Однак графіки розподілу напруги по гірлянді ізоляторів наведемо для обох випадків для відображення картини процесу.

3.4.1. Моделювання гірлянди 35 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним дефектним ізолятором (2-ий від проводу).

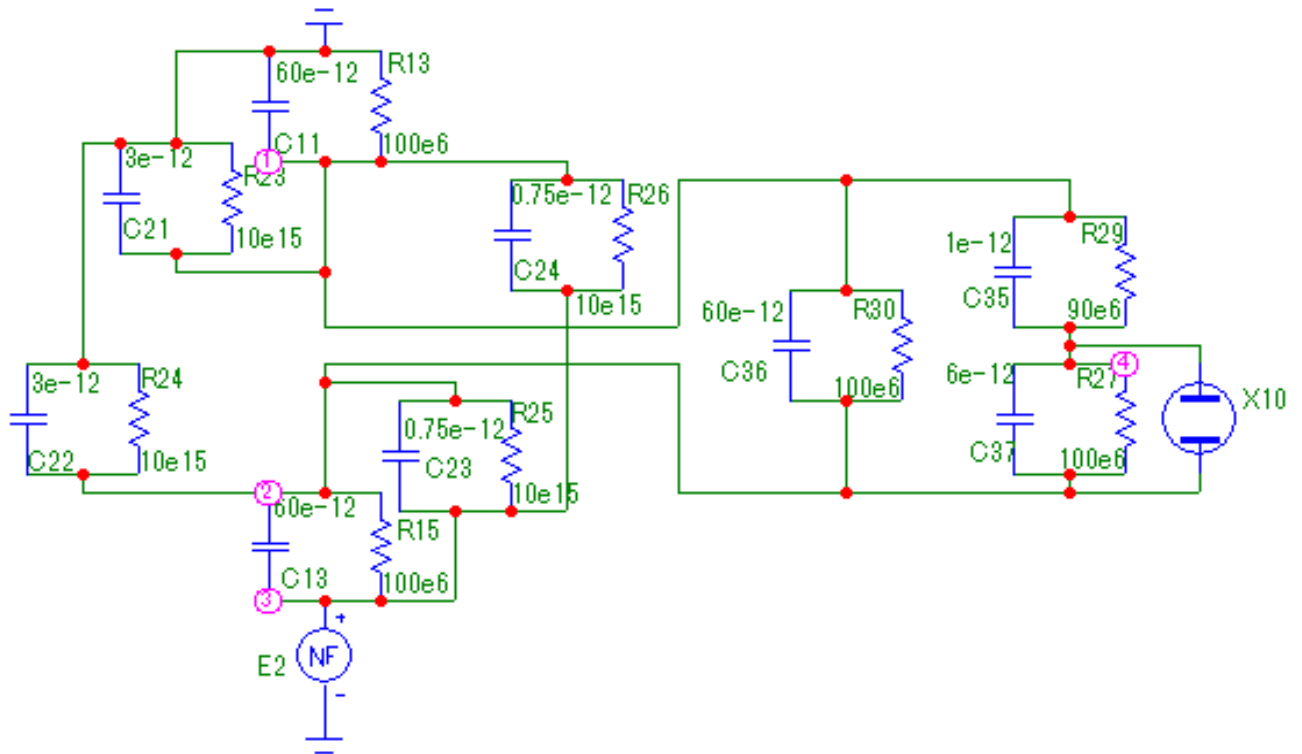


Рис. 3.22. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди.

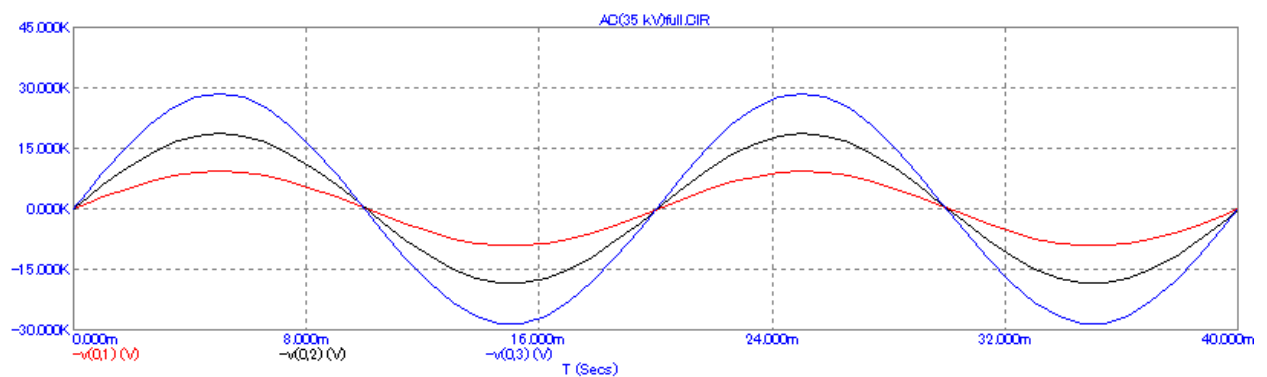


Рис. 3.23. Розподіл напруги по неушкодженій гірлянді ізоляторів.

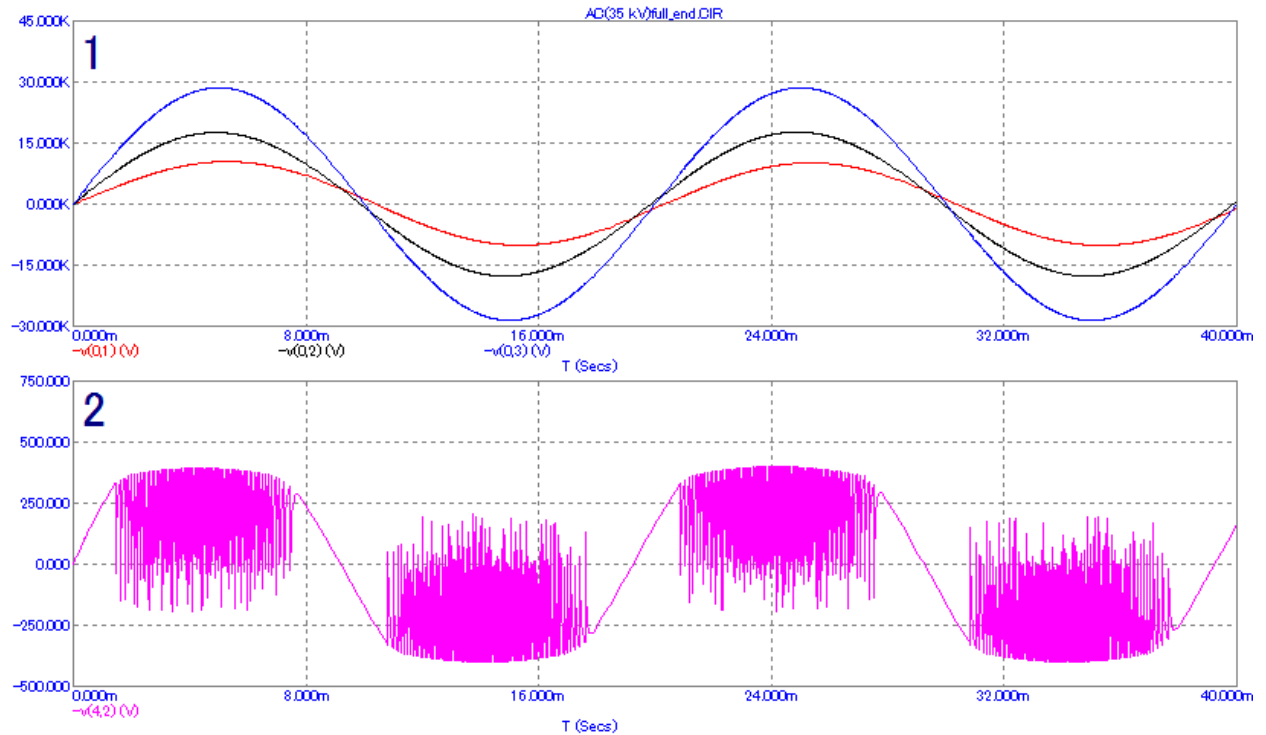


Рис. 3.24. Розподіл напруги по гірлянці з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 1
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 35 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	9,36	32,8	10,1	35,3
2	9,36	32,8	7,87	27,5
3	10,03	35,1	10,91	38,2

3.4.2. Моделювання гірлянди 110 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (3-ій від проводу).

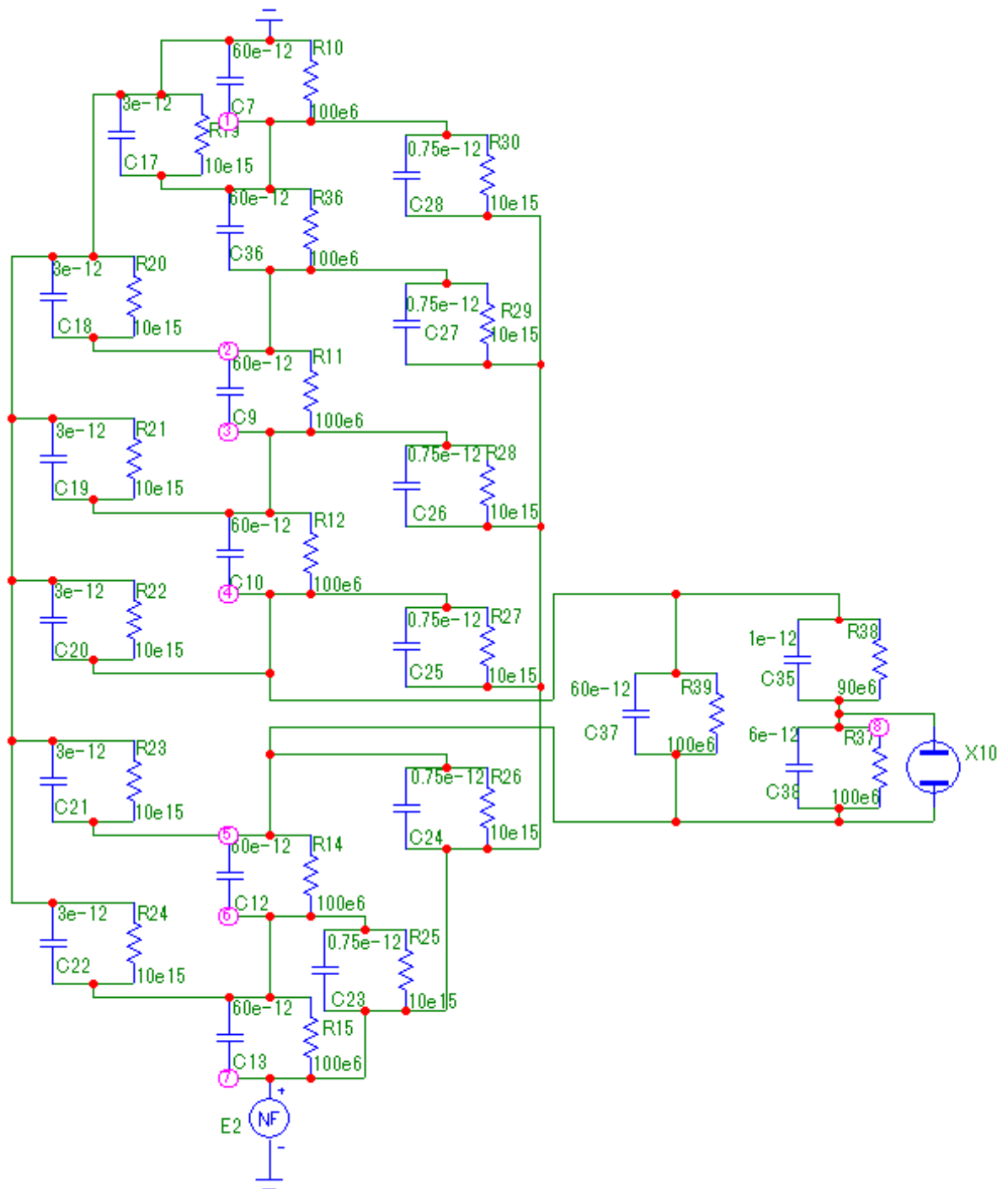


Рис. 3.25. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди.

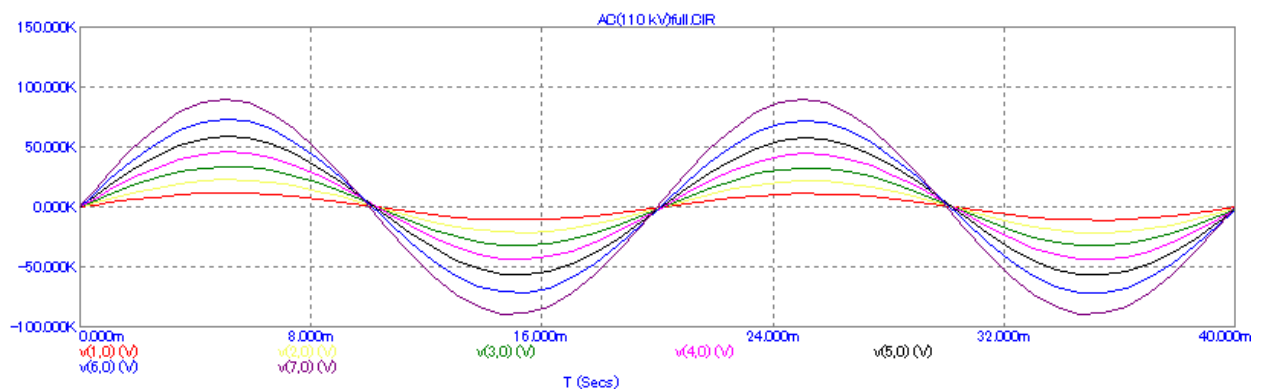


Рис. 3.26. Розподіл напруги по неущкодженій гірлянді ізоляторів

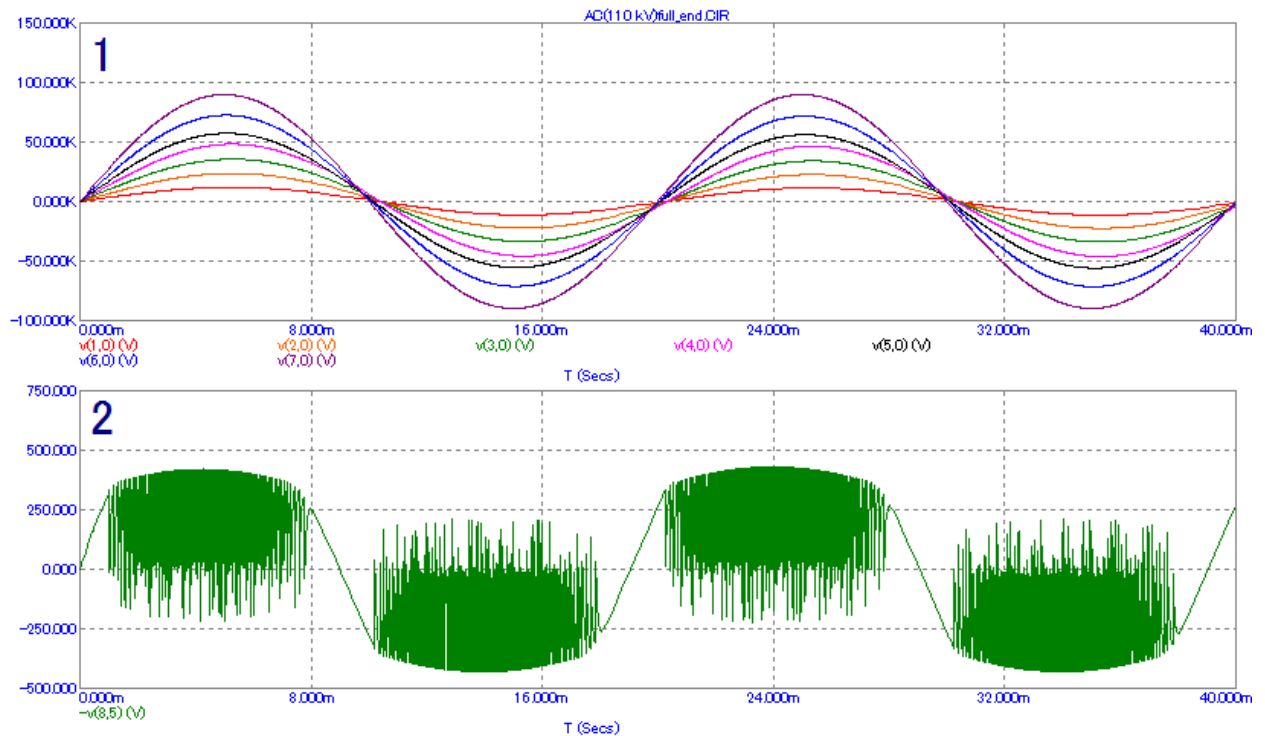


Рис. 3.27. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 2
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 110 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	11,37	12,7	11,28	12,6
2	11,38	12,7	11,01	12,3
3	11,31	12,6	11,32	12,6
4	11,91	13,3	12,22	13,6
5	12,97	14,4	9,52	10,6
6	14,54	16,2	15,62	17,4
7	16,69	18,6	18,22	20,3

3.4.3. Моделювання гірлянди 150 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (4-ий від проводу).

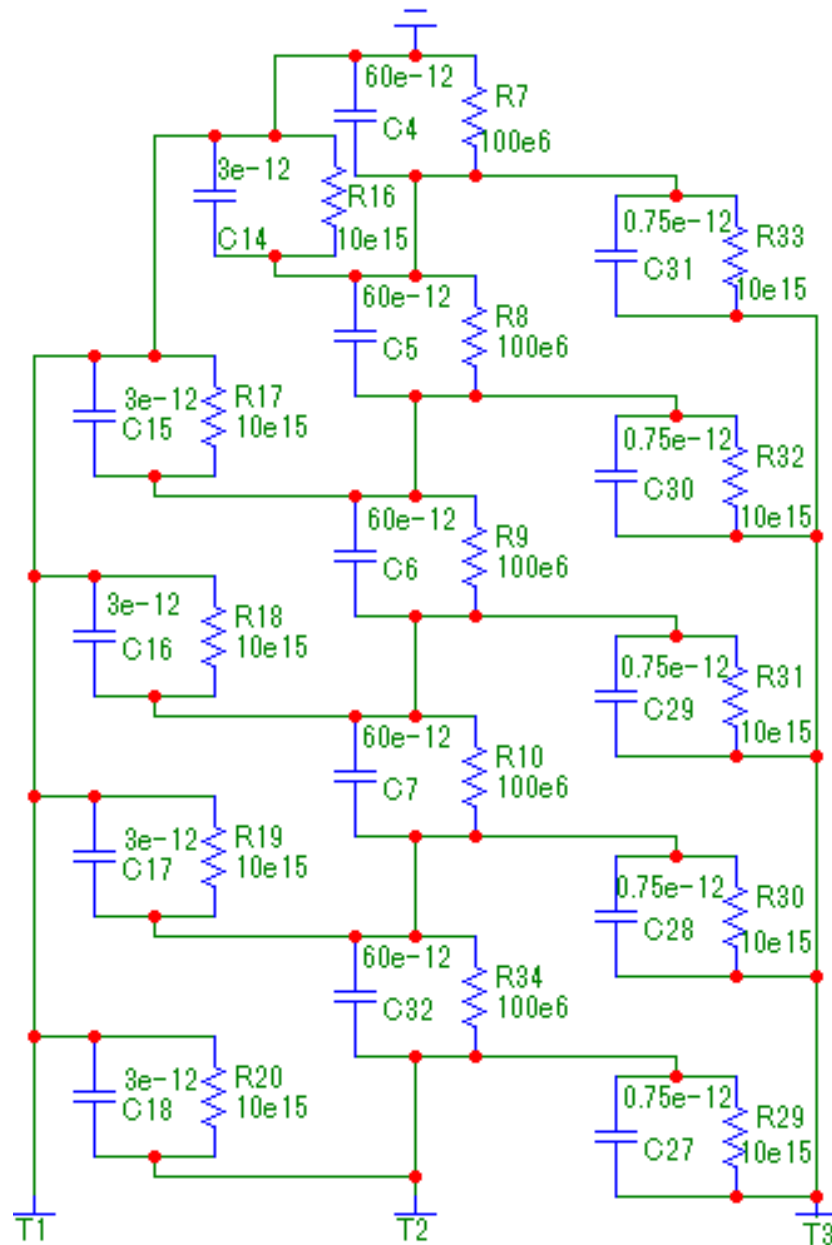


Рис. 3.28.1. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (6 – 10 ізолятори).

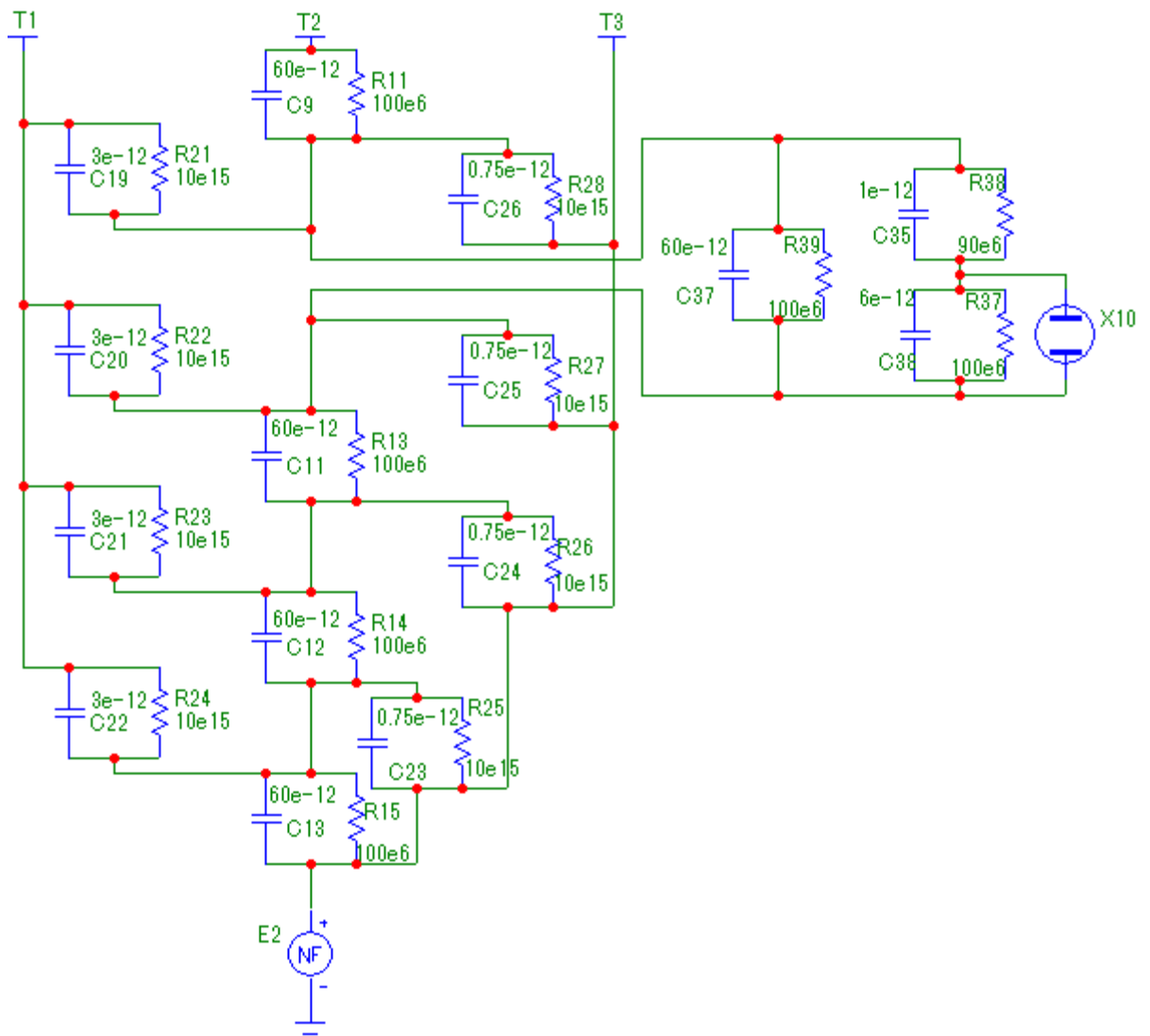


Рис. 3.28.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1 – 5 ізолятори).

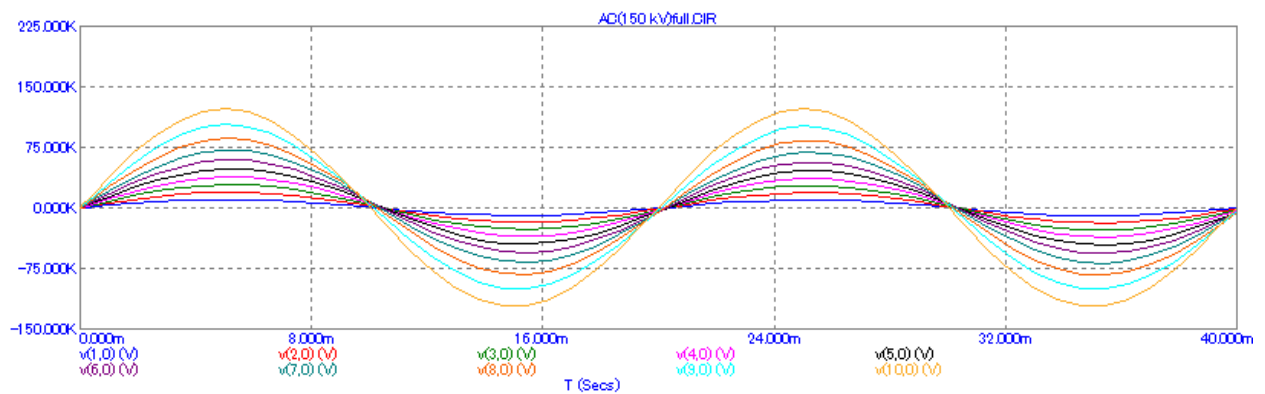


Рис. 3.29. Розподіл напруги по нешкодженій гірлянді ізоляторів.

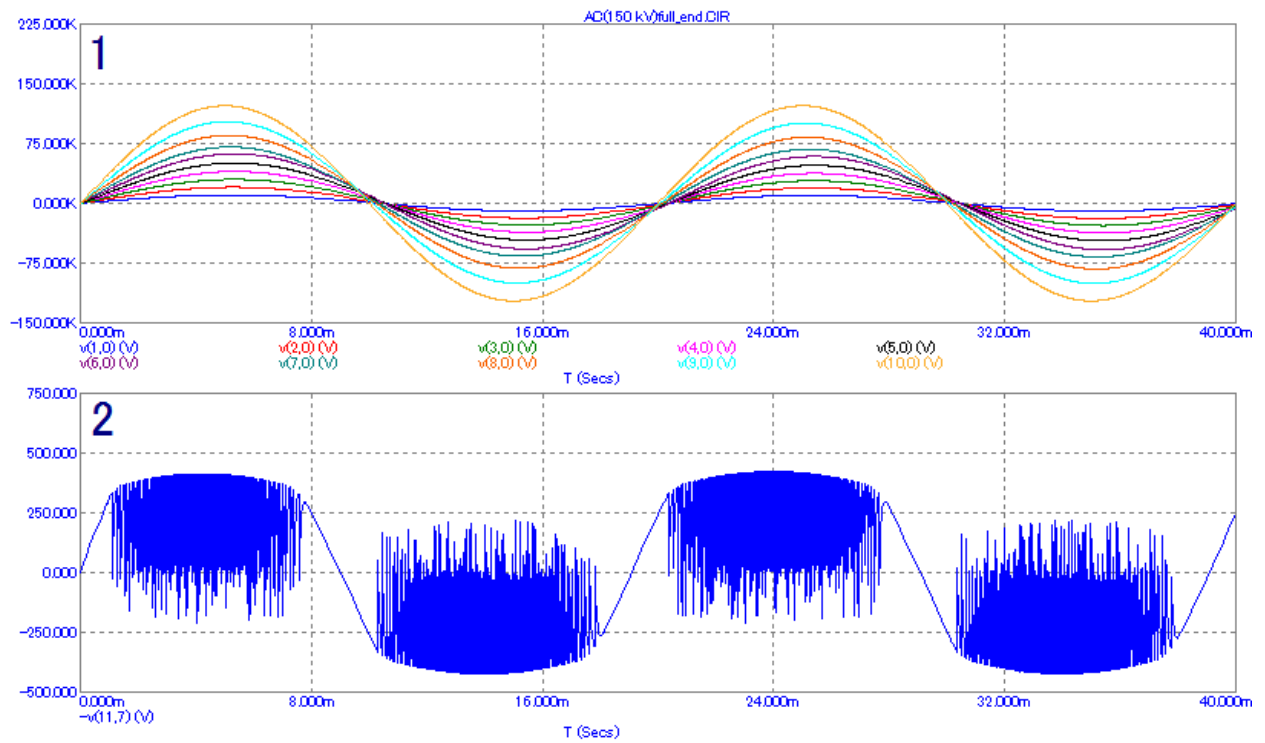


Рис. 3.30. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 3
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 150 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	9,4	7,7	9,58	7,8
2	8,71	7,1	8,9	7,3
3	8,48	6,9	8,72	7,1
4	8,71	7,1	9,01	7,4
5	9,42	7,7	9,8	8
6	10,63	8,7	11,13	9,2
7	12,38	10,1	9,15	7,5
8	14,74	12	15,3	12,5
9	17,78	14,5	18,27	14,9
10	21,6	17,6	22,07	18

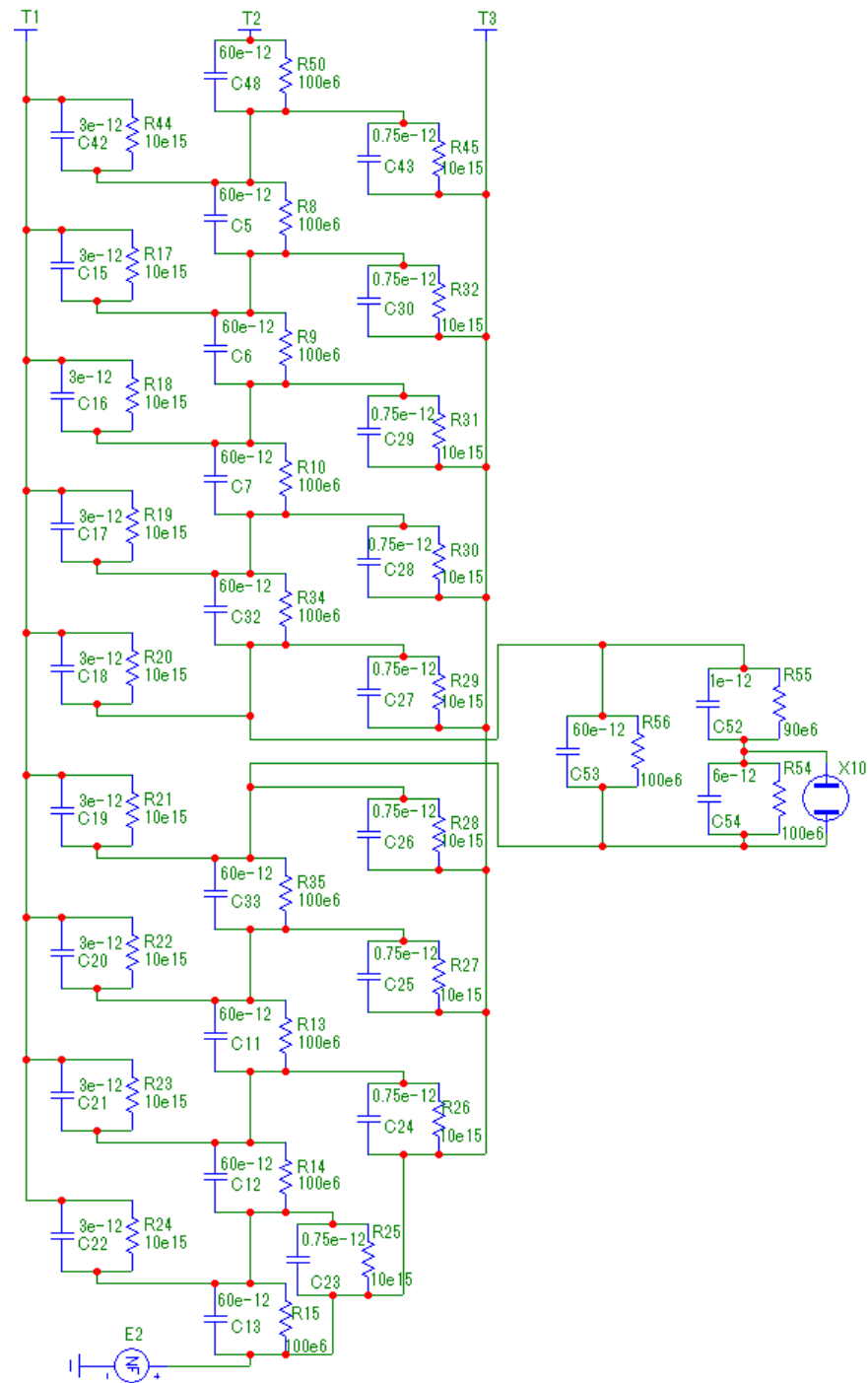


Рис. 3.31.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1–10 ізолятори).

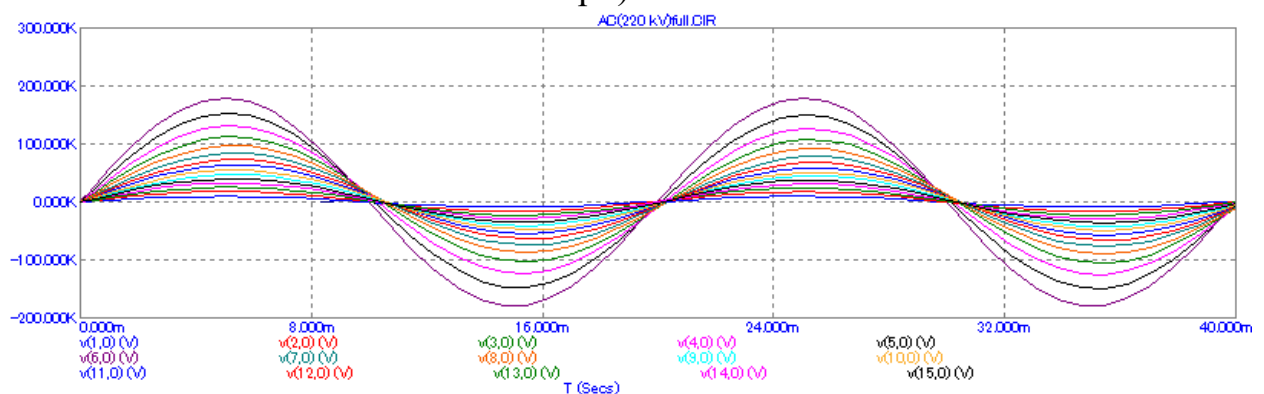


Рис. 3.32. Розподіл напруги по неушкодженій гірлянді ізоляторів.

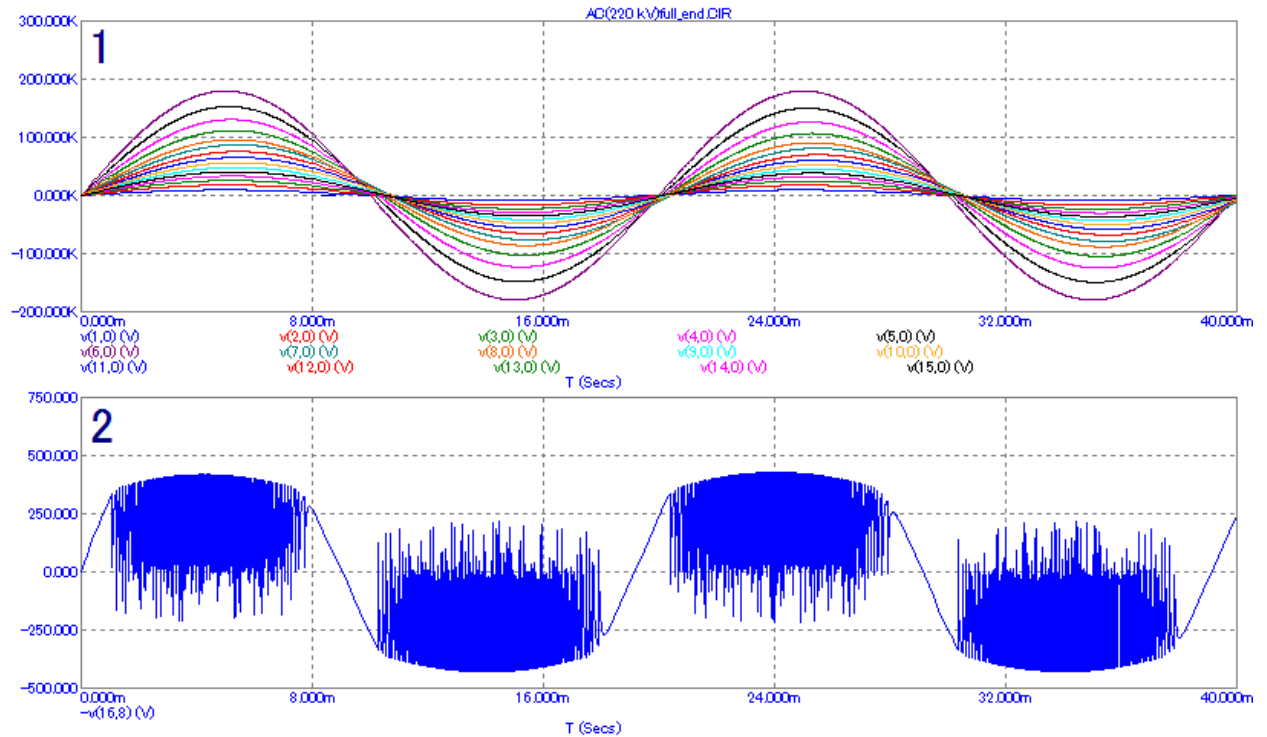


Рис. 3.33. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 4

Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 220 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	8,9	4,95	8,92	4,96
2	7,51	4,18	7,54	4,19
3	6,54	3,64	6,58	3,66
4	5,95	3,31	6,01	3,34
5	5,73	3,19	5,82	3,24
6	5,87	3,26	6,01	3,34
7	6,4	3,56	6,59	3,66
8	7,33	4,08	7,59	4,22
9	8,71	4,85	9,06	5,04
10	10,6	5,9	11,06	6,15
11	13,08	7,28	10,03	5,58
12	16,25	9,04	16,73	9,31
13	20,23	11,26	20,62	11,47
14	25,18	14,02	25,5	14,19
15	31,26	17,4	31,53	17,55

3.4.5. Моделювання гірлянди 330 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (9-ий від проводу).

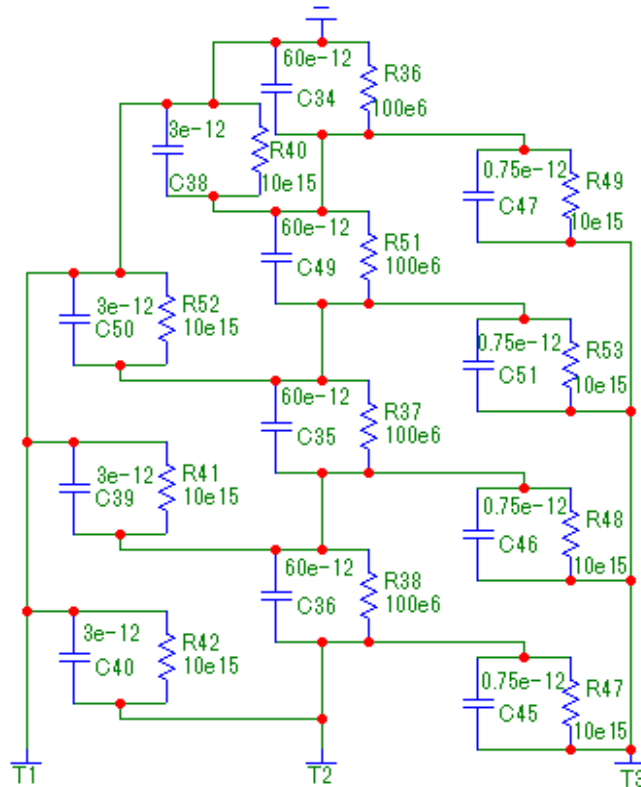


Рис. 3.34.1. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (17–20 ізолятори).

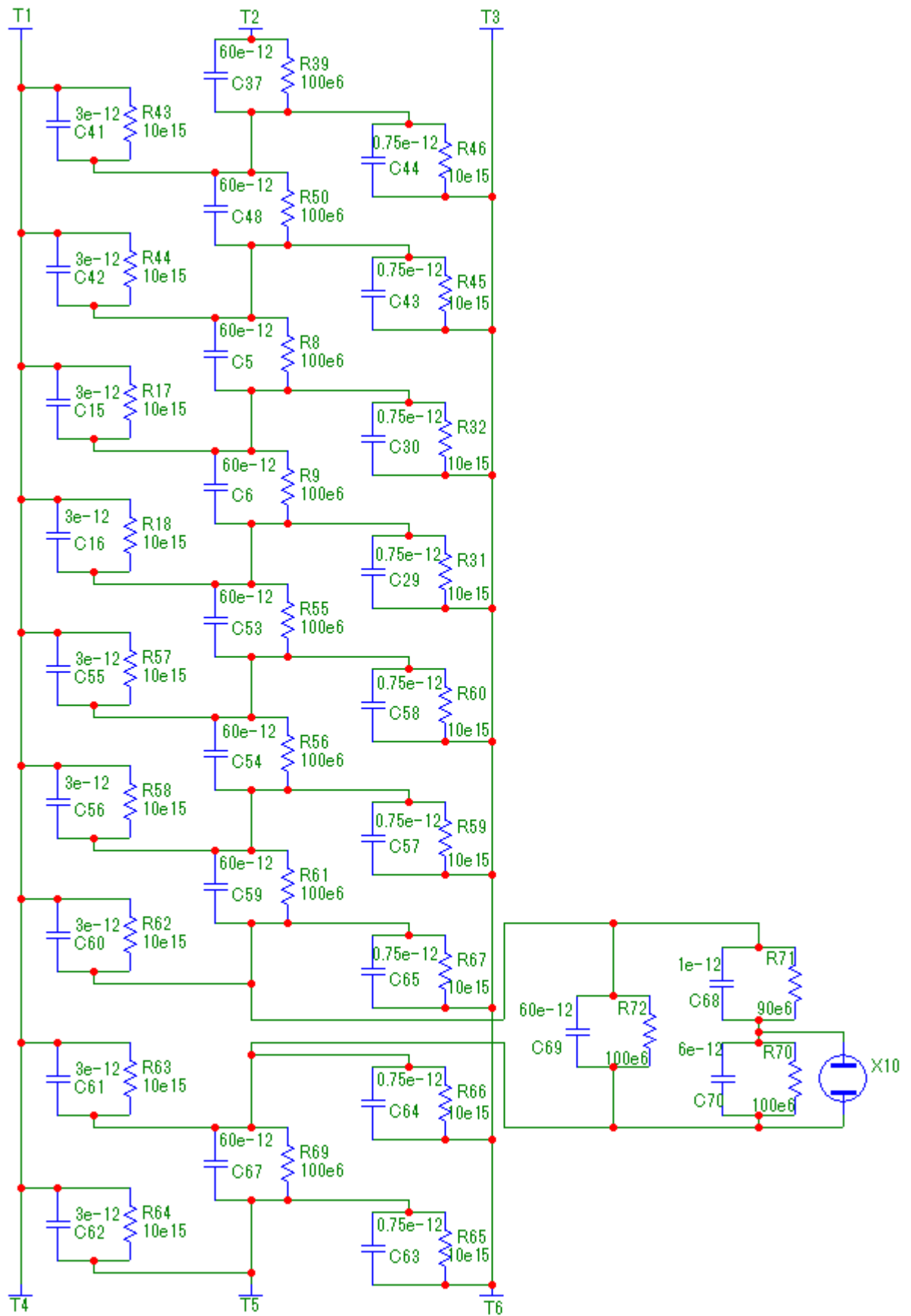


Рис. 3.34.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів(8–16 ізолятори).

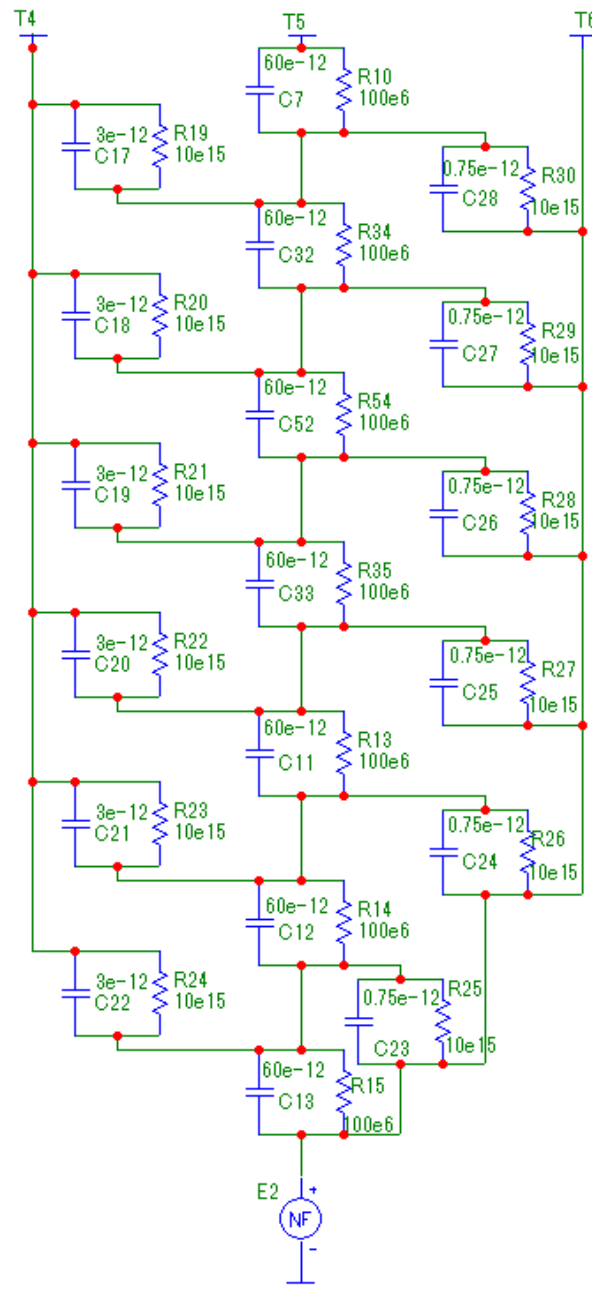


Рис. 3.34.3. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1–7 ізолятори).

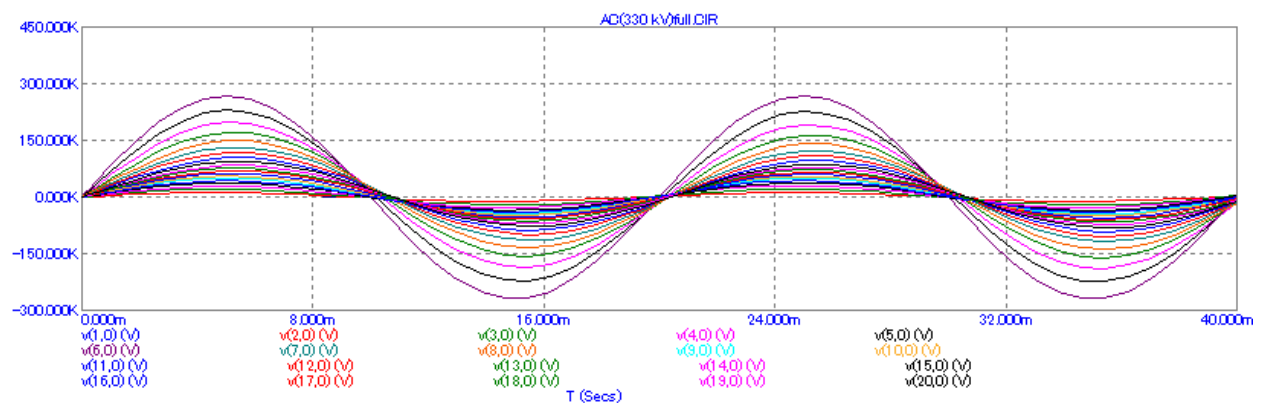


Рис. 3.35. Розподіл напруги по неушкодженій гірлянді ізоляторів.

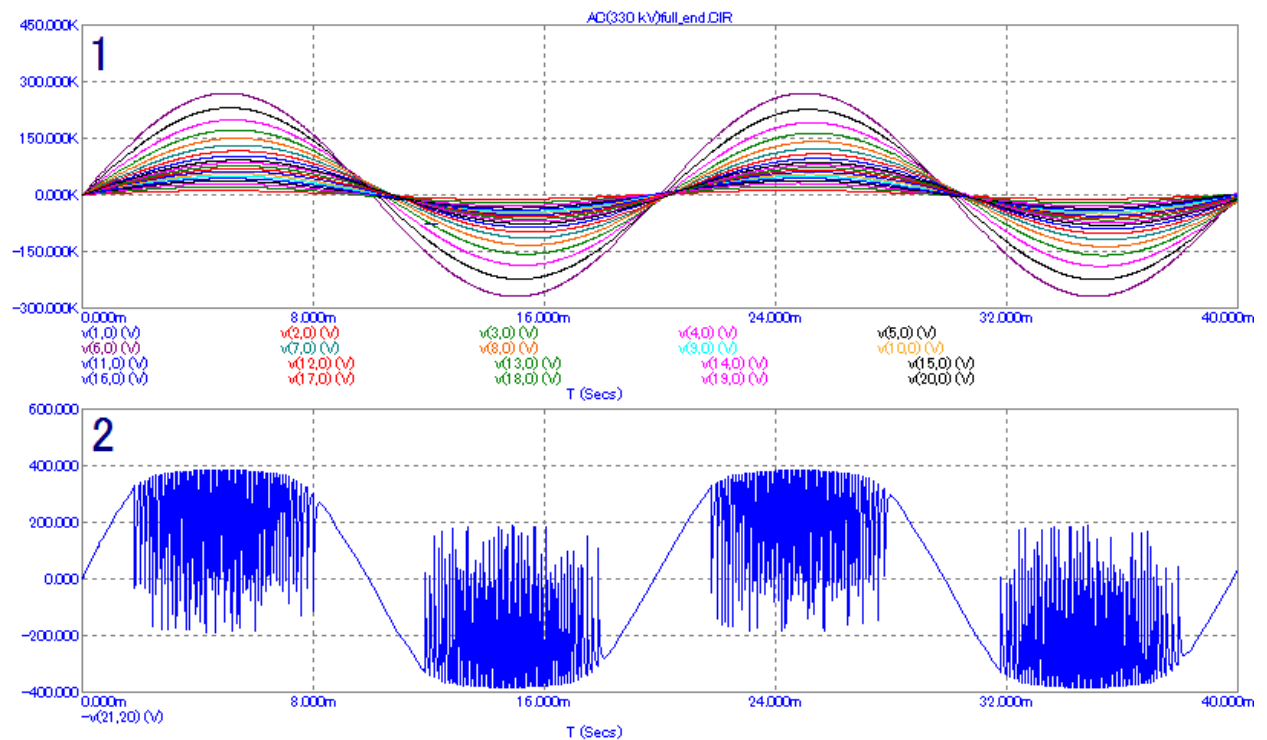


Рис. 3.36. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 5
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 330 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	11,65	4,32	11,62	4,31
2	9,3	3,45	9,29	3,44
3	7,46	2,77	7,46	2,77

Продовження таблиці 5

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 330 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
4	6,05	2,24	6,06	2,25
5	5,03	1,86	5,05	1,87
6	4,34	1,61	4,38	1,62
7	3,97	1,47	4	1,48
8	3,92	1,45	4,03	1,49
9	4,18	1,55	4,3	1,59
10	4,78	1,77	4,94	1,83
11	5,74	2,13	5,97	2,21
12	7,13	2,64	6,41	2,38
13	9,01	3,34	9,25	3,43
14	11,48	4,26	11,66	4,33
15	14,65	5,43	14,78	5,48
16	18,67	6,92	18,77	6,96
17	23,72	8,8	23,78	8,82
18	30	11,13	30,03	11,14
19	37,78	14,02	37,77	14,01
20	47,36	17,57	47,3	17,55

3.4.6. Моделювання гірлянди 500 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (11-ий від проводу).

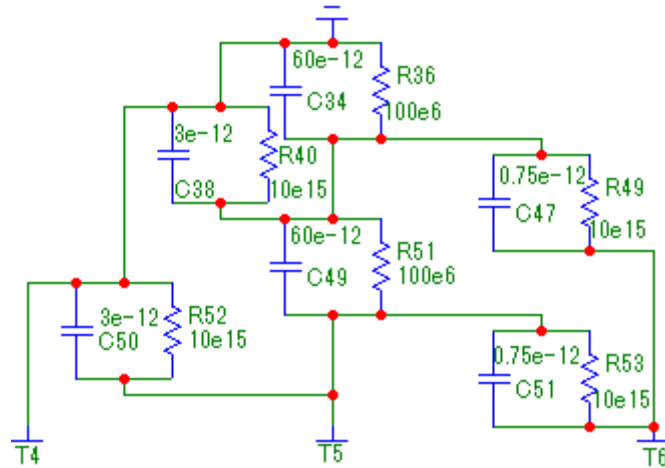


Рис. 3.37.1. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (24 – 25 ізолятори).

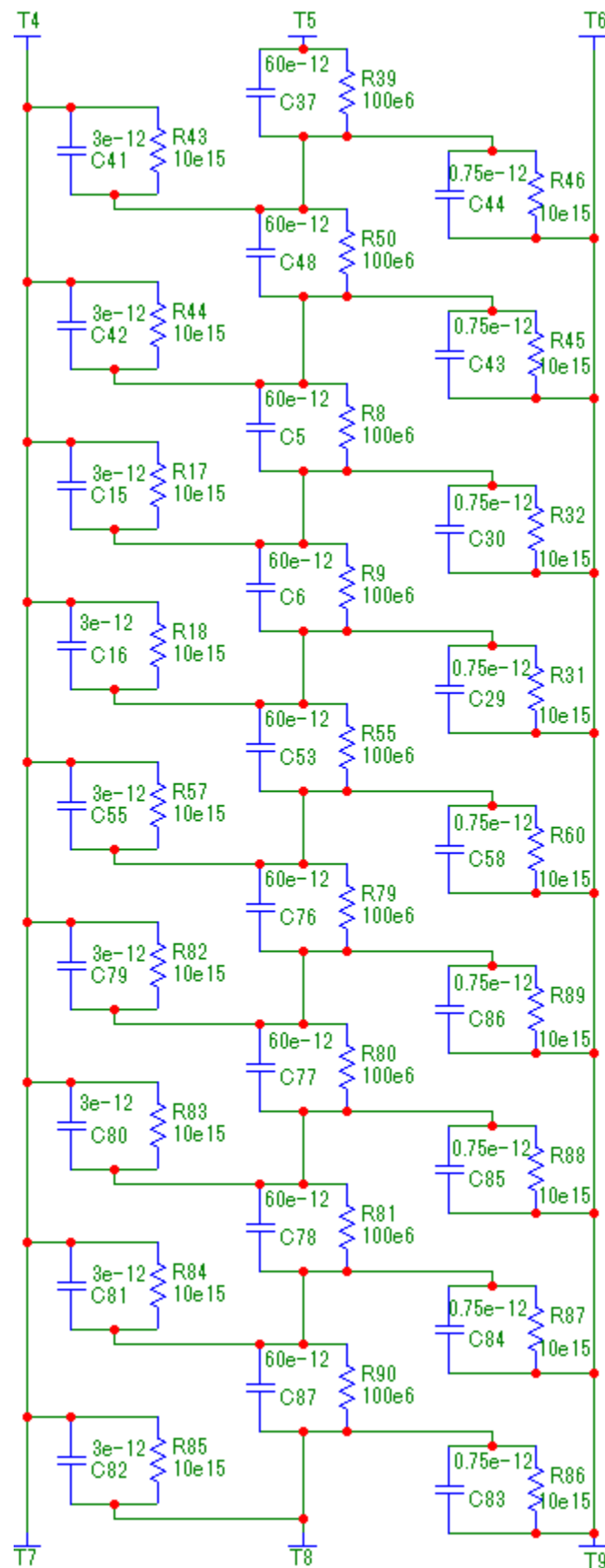


Рис. 3.37.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (15 – 23 ізолятори).

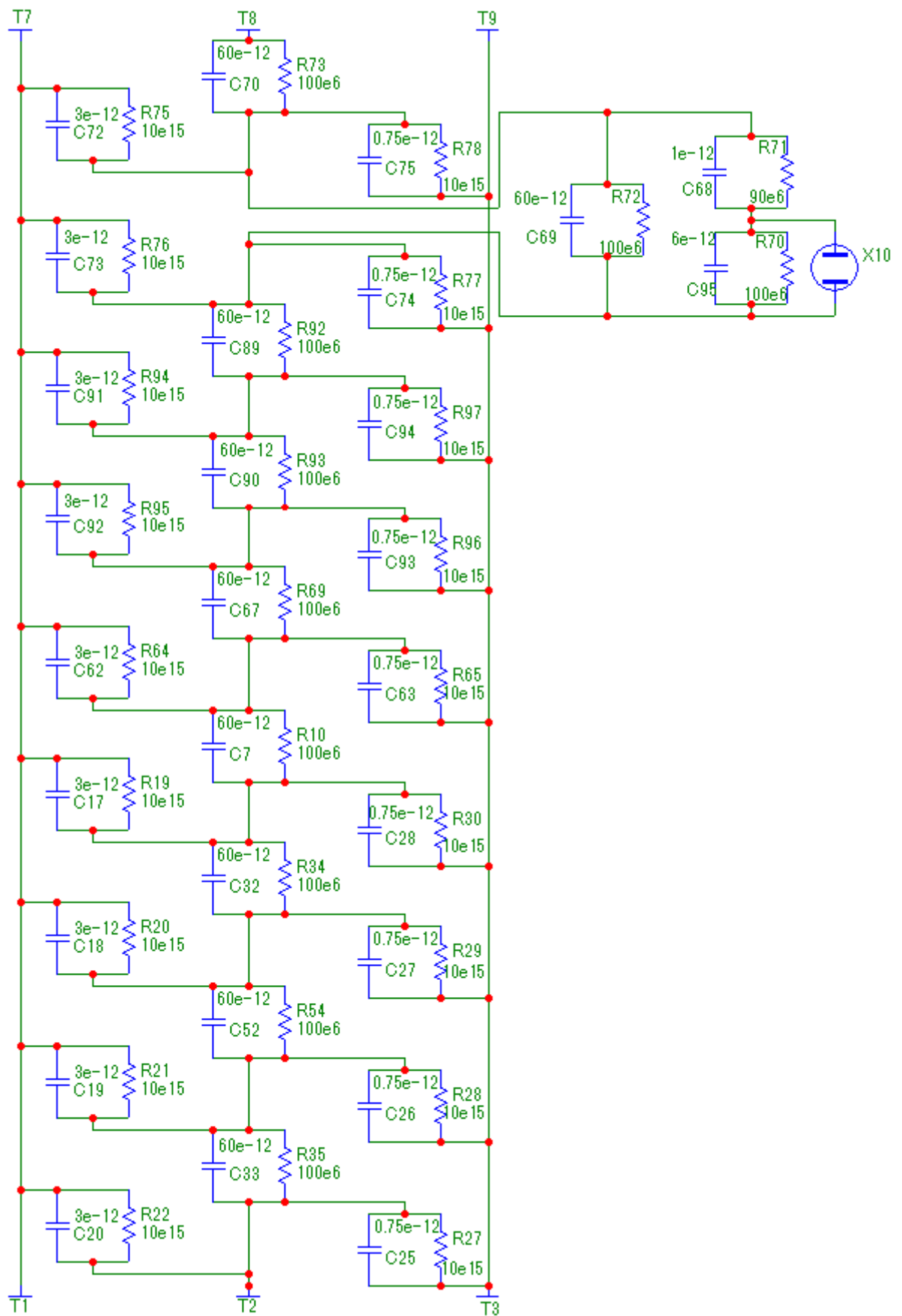


Рис. 3.37.3. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (6 – 14 ізолятори).

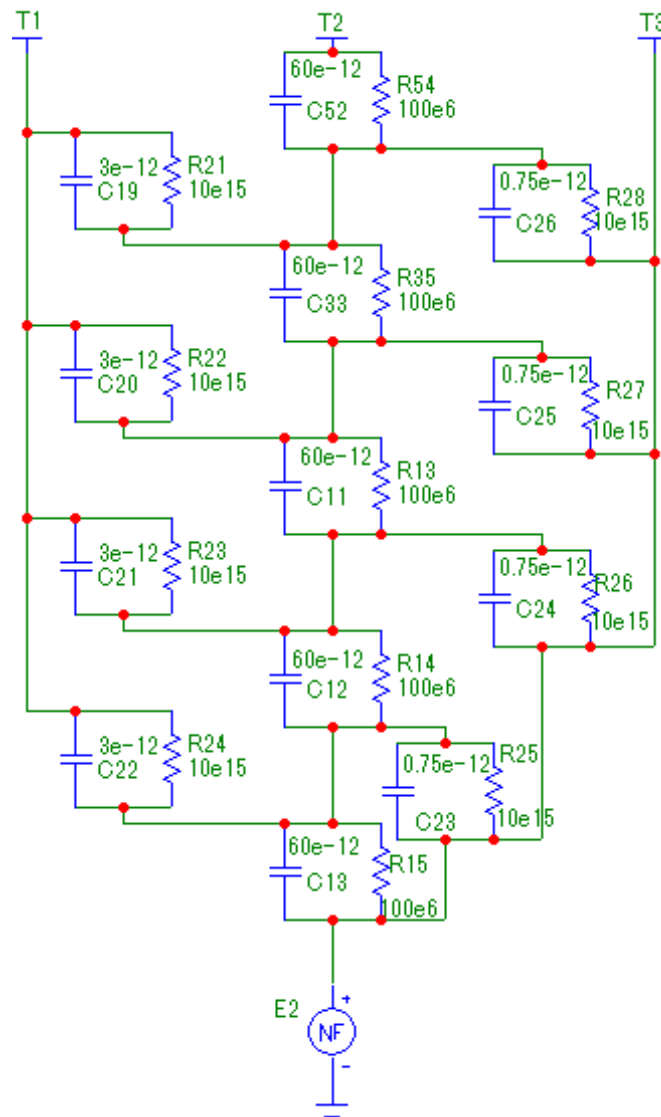


Рис. 3.37.4. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1 – 5 ізолятори).

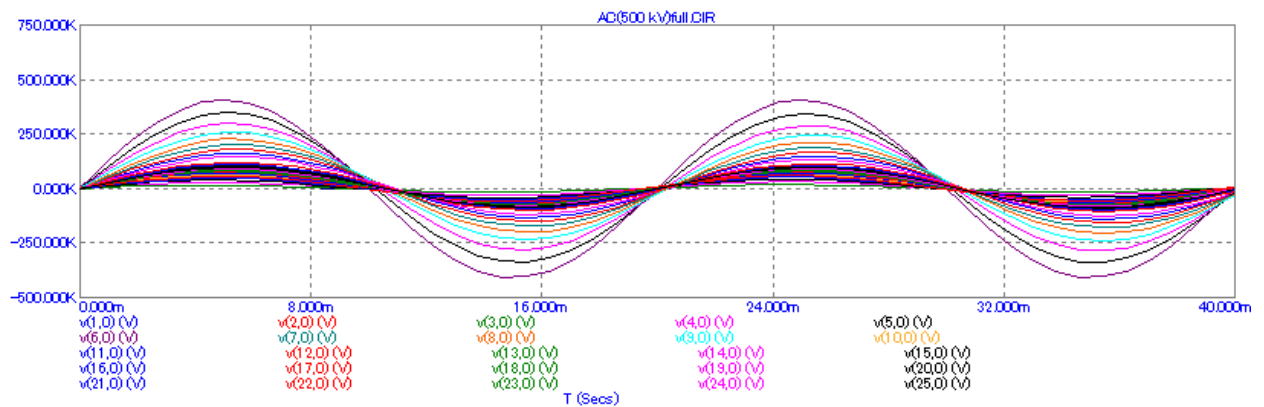


Рис. 3.38. Розподіл напруги по неушкодженій гірлянді ізоляторів.

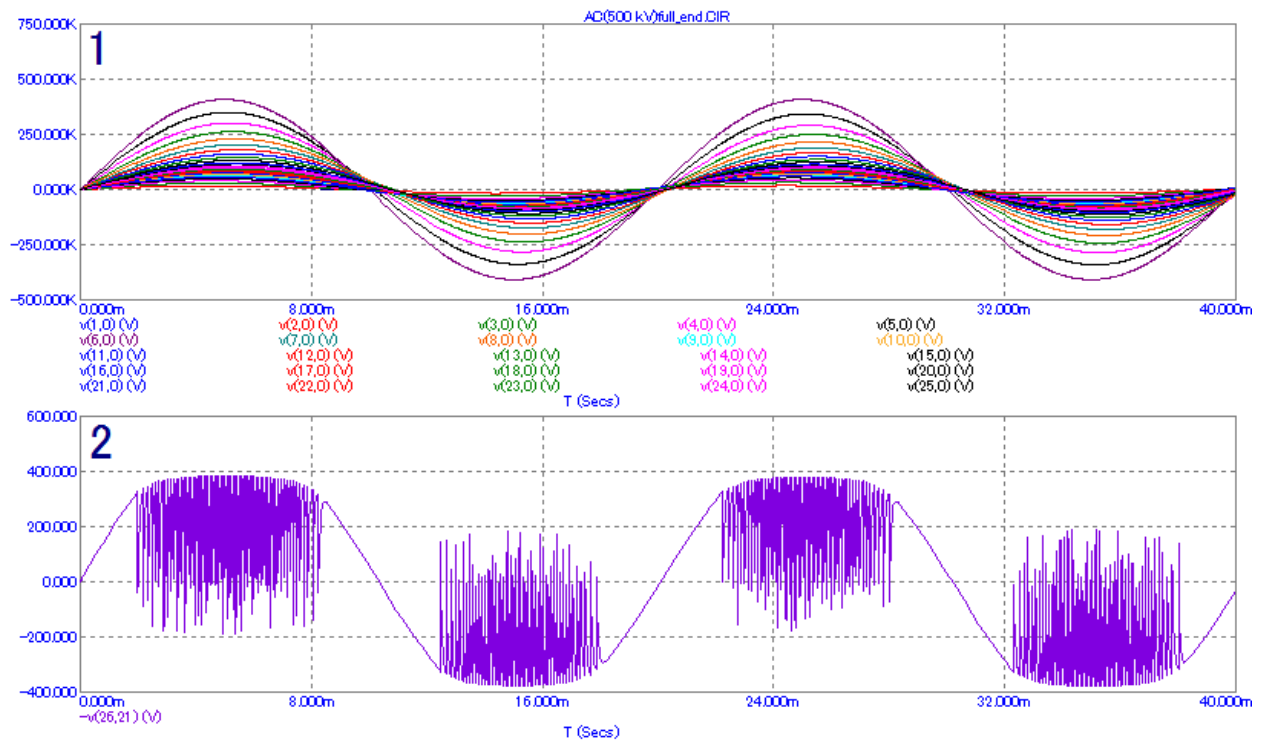


Рис. 3.39. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 6
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 500 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	17,4	4,26	17,38	4,26
2	13,78	3,37	13,72	3,36

Продовження таблиці 6

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 500 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
3	10,86	2,66	10,77	2,64
4	8,51	2,08	8,4	2,06
5	6,66	1,63	6,53	1,6
6	5,21	1,27	5,09	1,24
7	4,13	1,01	3,99	0,98
8	3,35	0,82	3,22	0,79
9	2,86	0,7	2,73	0,67
10	2,63	0,64	2,51	0,61
11	2,67	0,65	2,56	0,63
12	2,98	0,73	2,88	0,7
13	3,6	0,88	3,51	0,86
14	4,54	1,11	4,49	1,1
15	5,88	1,44	5,67	1,39
16	7,69	1,88	7,6	1,86
17	10,07	2,47	9,92	2,43
18	13,13	3,21	12,93	3,17
19	17,03	4,17	16,8	4,11
20	21,96	5,38	21,72	5,32
21	28,15	6,89	27,9	6,83
22	35,86	8,78	35,64	8,73
23	45,43	11,13	45,27	11,09
24	57,25	14,02	57,19	14,01
25	71,78	17,58	71,9	17,61

3.4.7. Моделювання гірлянди 750 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (15-ий від проводу).

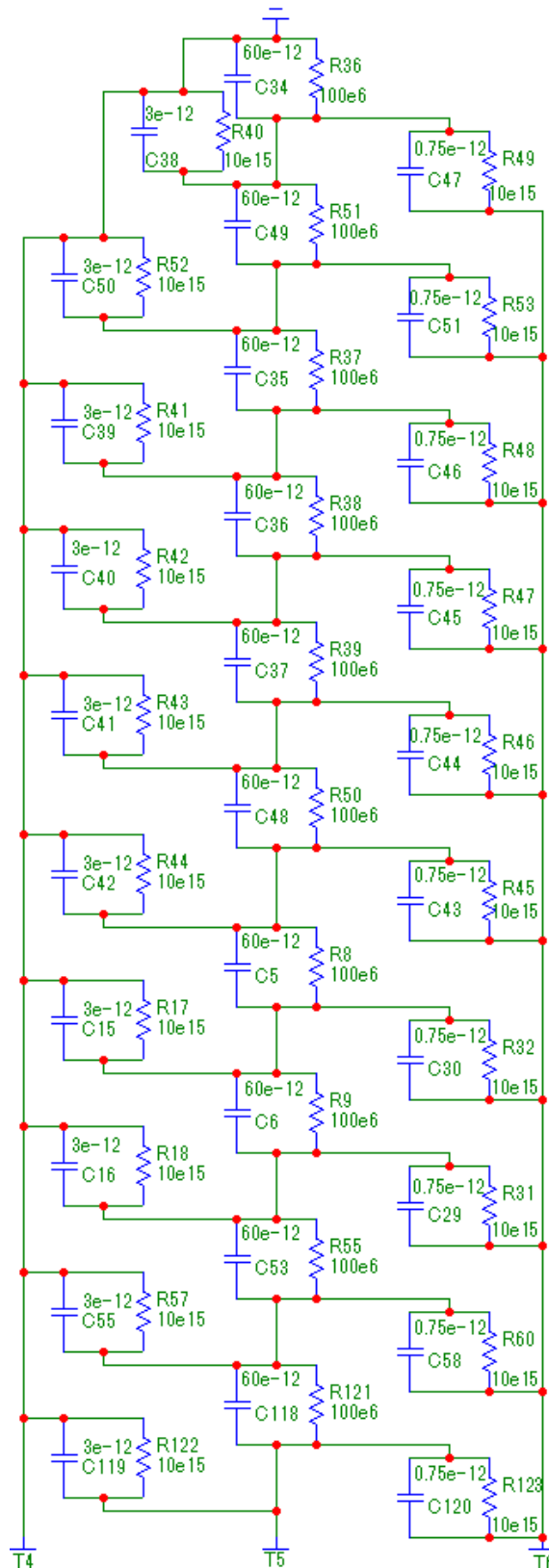


Рис. 3.40.1. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (20 – 29 ізолятори).

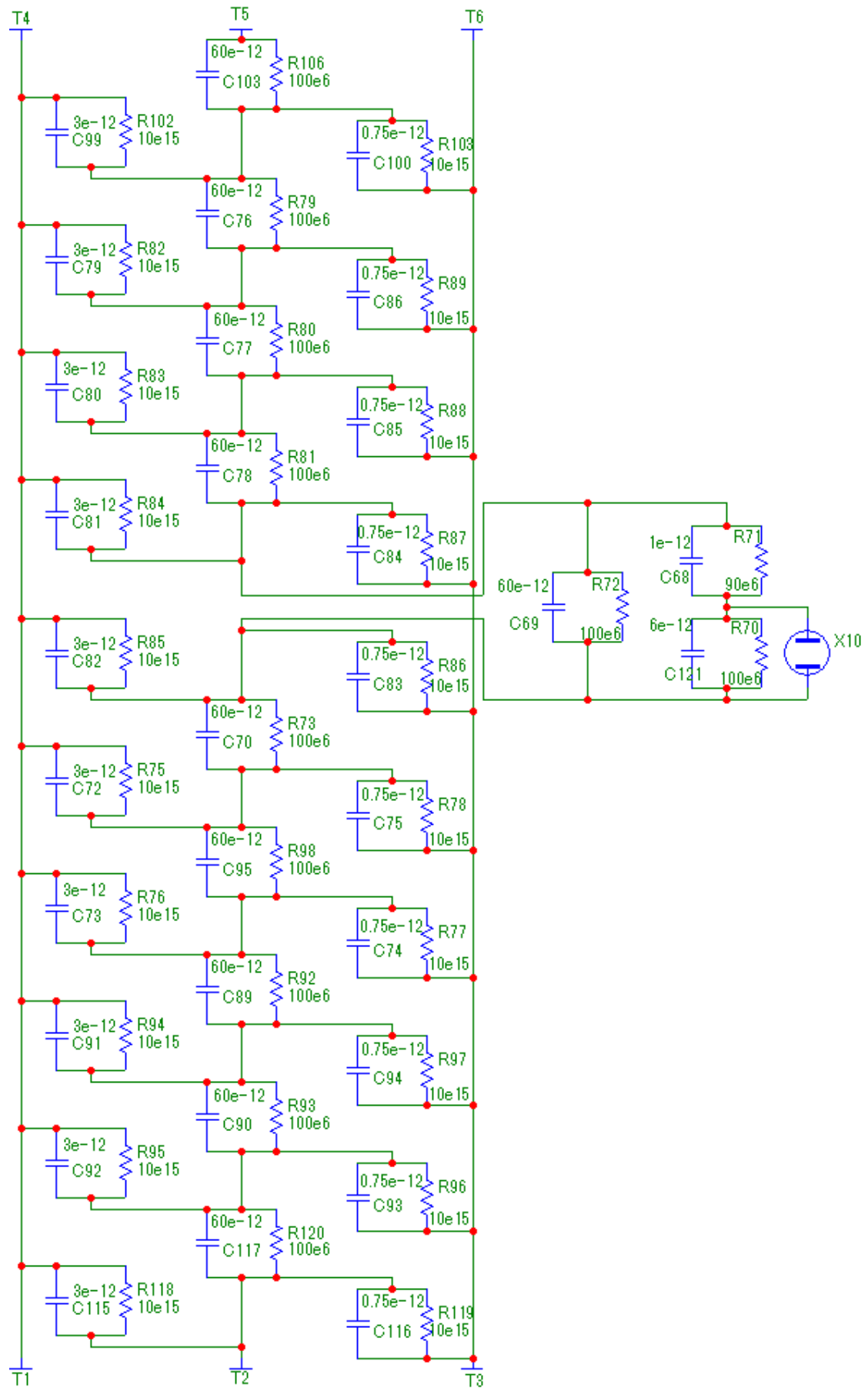


Рис. 3.40.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (10 – 19 ізолятори).

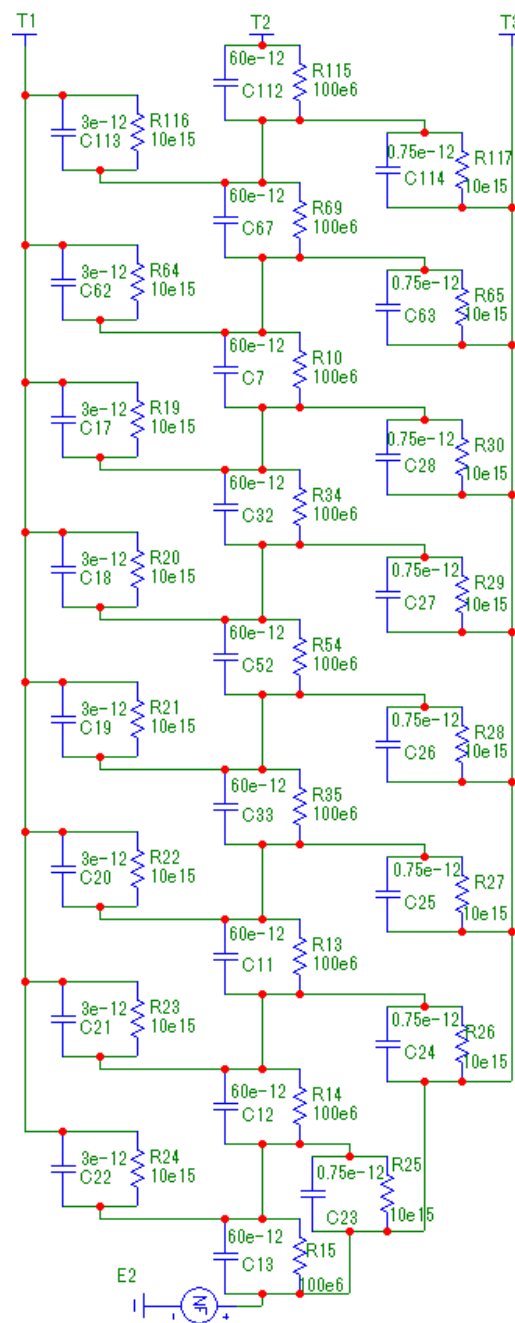


Рис. 3.40.3. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1 – 9 ізолятори).

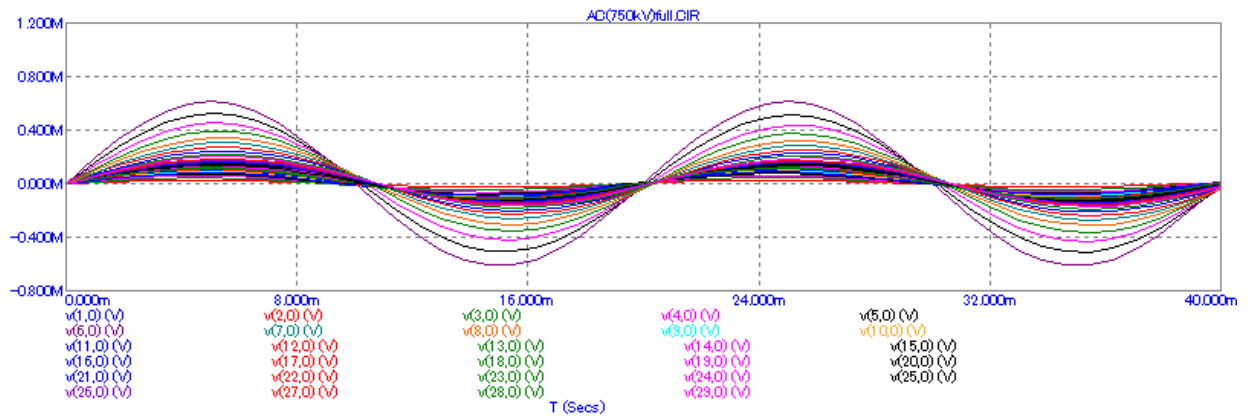


Рис. 3.41. Розподіл напруги по нешкодженій гірлянді ізоляторів.

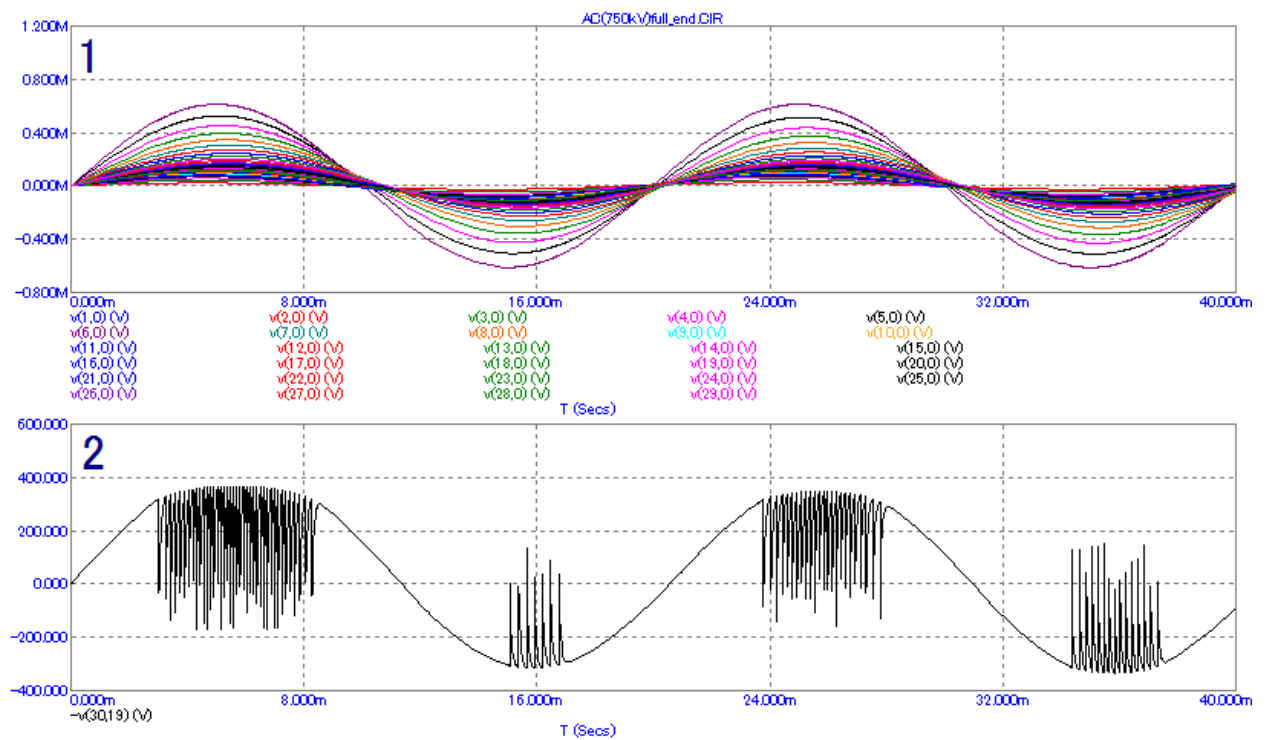


Рис. 3.42. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 7
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 750 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	26,25	4,29	26,17	4,27
2	20,86	3,41	20,81	3,40
3	16,46	2,69	16,43	2,68
4	12,9	2,11	12,89	2,10
5	10,03	1,64	10,02	1,64
6	7,74	1,26	7,73	1,26
7	5,92	0,97	5,92	0,97
8	4,51	0,74	4,51	0,74
9	3,44	0,56	3,44	0,56
10	2,67	0,44	2,68	0,44
11	2,16	0,35	2,18	0,36
12	1,91	0,31	1,94	0,32
13	1,9	0,31	1,96	0,32
14	2,15	0,35	2,23	0,36
15	2,67	0,44	3,39	0,55
16	3,52	0,57	3,61	0,59
17	4,73	0,77	4,81	0,79
18	6,39	1,04	6,46	1,05
19	8,59	1,40	8,66	1,41
20	11,45	1,87	11,53	1,88
21	15,13	2,47	15,21	2,48
22	19,82	3,24	19,9	3,25
23	25,73	4,20	25,82	4,22
24	33,16	5,42	33,25	5,43
25	42,45	6,93	42,52	6,94
26	53,98	8,81	54,03	8,82
27	68,26	11,15	68,25	11,15
28	85,85	14,02	85,75	14,00
29	107,44	17,54	107,2	17,51

Було порівняно розподіл напруги вздовж ізоляторів гірлянди ЛЕП змінного струму 35, 110, 150, 220, 330, 500 та 750 кВ за наявності та відсутності часткових розрядів на пошкодженому ізоляторі.

Аналіз таблиць 1 – 7 показав, що наявність часткових розрядів в окремому ізоляторі гірлянди призводить до порушення рівномірності розподілу напруги вздовж ізоляторів цієї гірлянди. Наприклад, для гірлянд ЛЕП 35 кВ найбільше порушення рівномірності – це зменшення напруги на 2-му (пошкодженому) ізоляторі з 32,8 % до 27,5 %; для гірлянд ЛЕП 110 кВ найбільше порушення рівномірності – зменшення напруги на 5-му (пошкодженому) ізоляторі з 14,4 % до 10,6 %; для гірлянд ЛЕП 150 кВ це порушення – зменшення напруги на 7-му (пошкодженому) ізоляторі з 10,1 % до 7,5 %; для гірлянд ЛЕП 220 кВ – зменшення напруги на 11-му (пошкодженому) ізоляторі з 7,28 % до 5,58 %; для гірлянд ЛЕП 330 кВ – зменшення напруги на 12-му (пошкодженому) ізоляторі з 2,64 % до 2,38 %; для гірлянд ЛЕП 500 кВ – зменшення напруги на 15-му (пошкодженому) ізоляторі з 1,44 % до 1,39 %; для гірлянд ЛЕП 750 кВ – збільшення напруги на 15-му (пошкодженому) ізоляторі з 0,44 % до 0,55 %.

Можна сказати, що зміна напруги на пошкодженому ізоляторі, викликана наявністю часткових розрядів на ньому, може мати достатньо помітний і критичний вплив на гірлянди ізоляторів середньої (35 кВ) та високої (110 – 220 кВ) напруги. Вплив часткових розрядів на розподіл напруги по гірлянді ізоляторів ЛЕП надвисокої напруги (330 – 750 кВ) майже відсутній і не несе загрози для ізоляційної конструкції, тим більше не викликає перекриття ізоляції. Такий розподіл зумовлений відносно великою кількістю ізоляторів у гірлянді ЛЕП надвисокої напруги у порівнянні з гірляндами ЛЕП середньої та високої напруги.

3.5. Моделювання гірлянди ізоляторів для ЛЕП постійного струму

Оскільки в останні роки в світі знову відновився інтерес до передачі електричної енергії на постійному струмі в зв'язку з передачею великої кількості електроенергії на значні відстані від потужних гідро- та вугільних електричних станцій, то є актуальною задача дослідження часткових розрядів в гірляндах ЛЕП постійного струму.

Для прикладу було обрано біполярну ЛЕП постійного струму ± 500 кВ. Параметри ізоляторів і значення опорів та ємностей взято аналогічно до гірлянд змінного струму. На таких ЛЕП використовуються гірлянди з 40 ізоляторів. [9]

Аналогічно до моделювання гірлянд змінного струму SPICE-модель схеми заміщення наводимо лише для гірлянди з дефектним ізолятором.

3.5.1. Моделювання гірлянди ЛЕП постійного струму ± 500 кВ

Наведемо SPICE-модель схеми заміщення з одним пошкодженим ізолятором (17-ий від проводу).

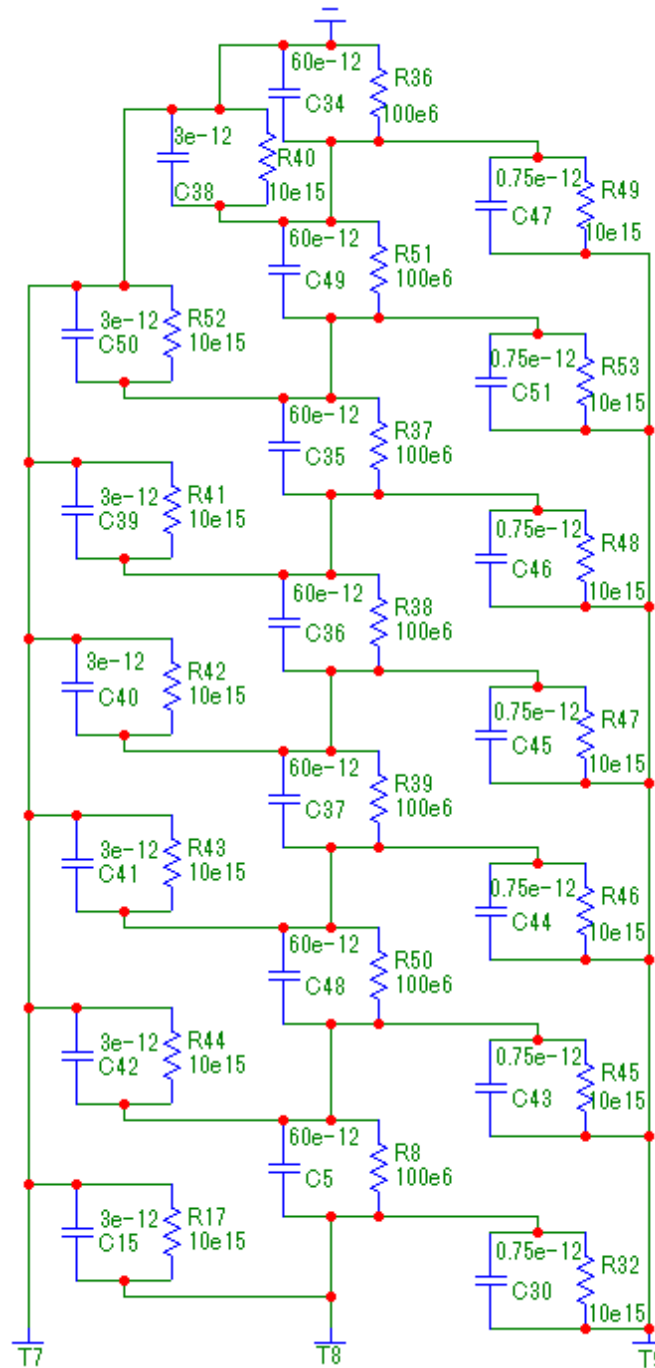


Рис. 3.43.1. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (34 – 40 ізолятори).

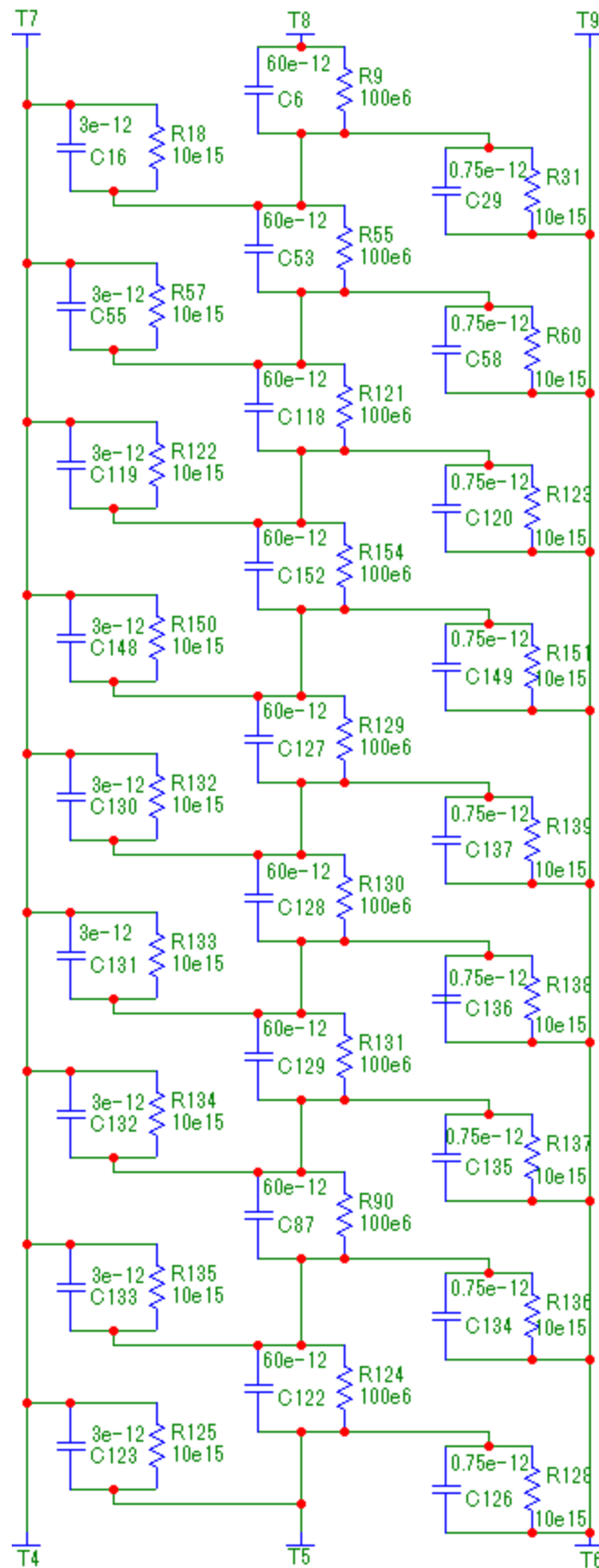


Рис. 3.43.2. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (25 – 33 ізолятори).

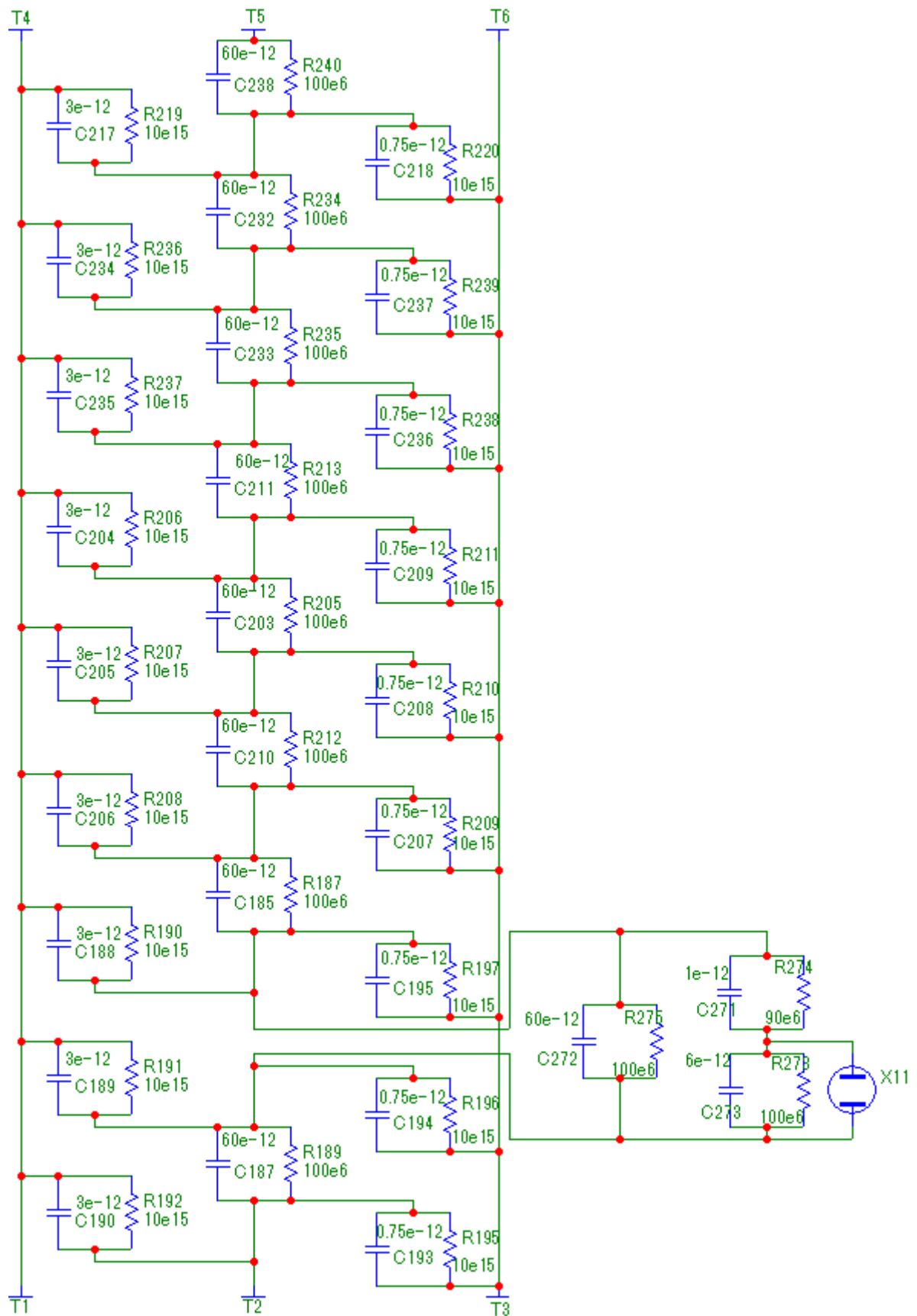


Рис. 3.43.3. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (16 – 24 ізолятори).

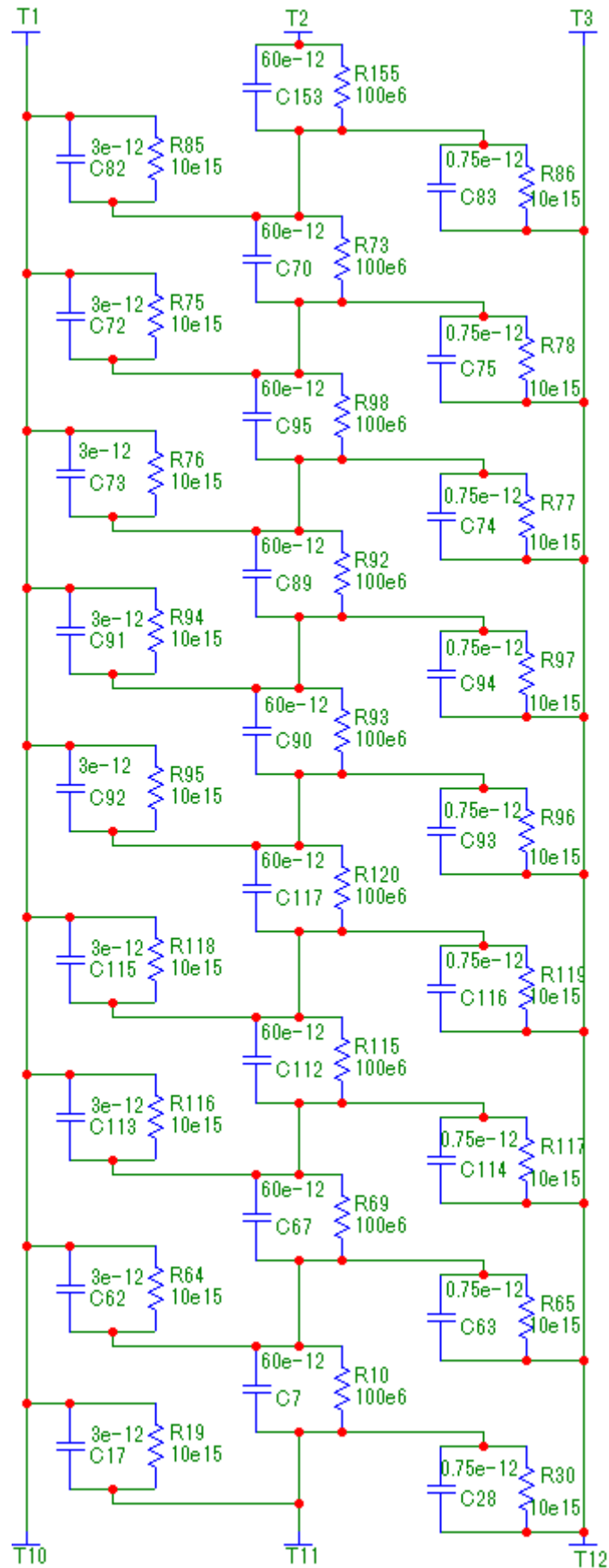


Рис. 3.43.4. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (7 – 15 ізолятори).

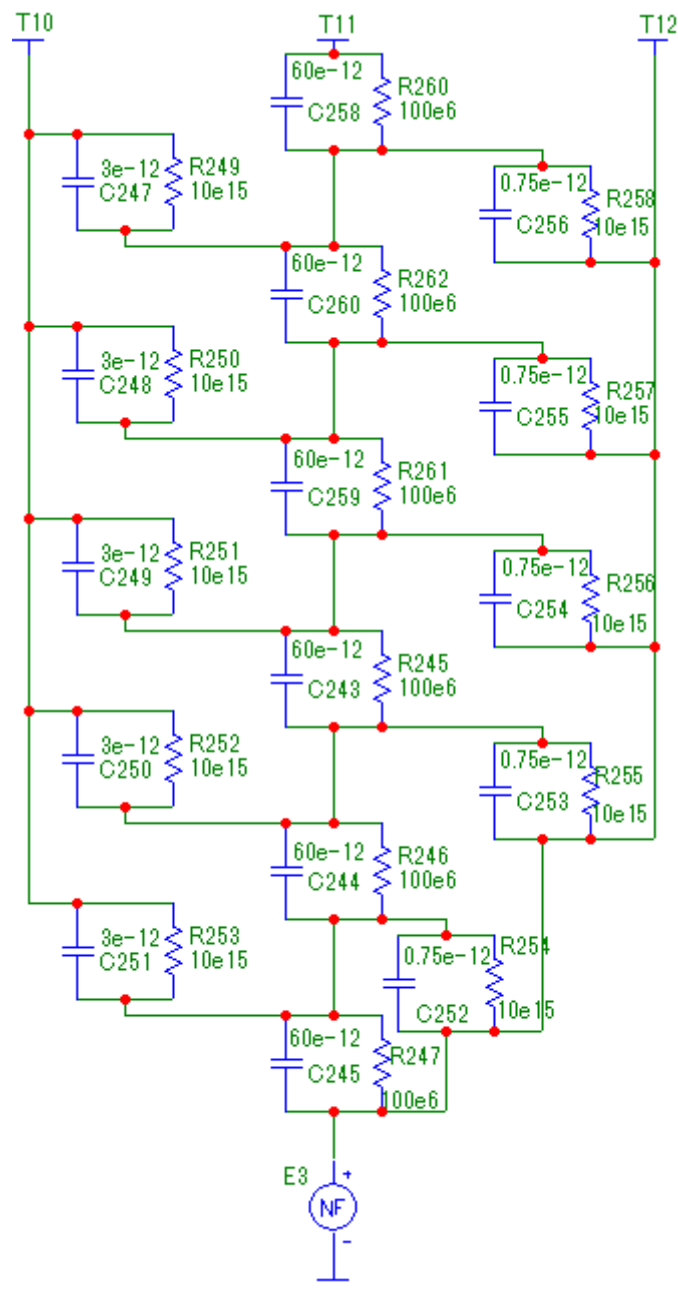


Рис. 3.43.5. SPICE-модель схеми заміщення гірлянди ізоляторів (1 – 6 ізолятори).

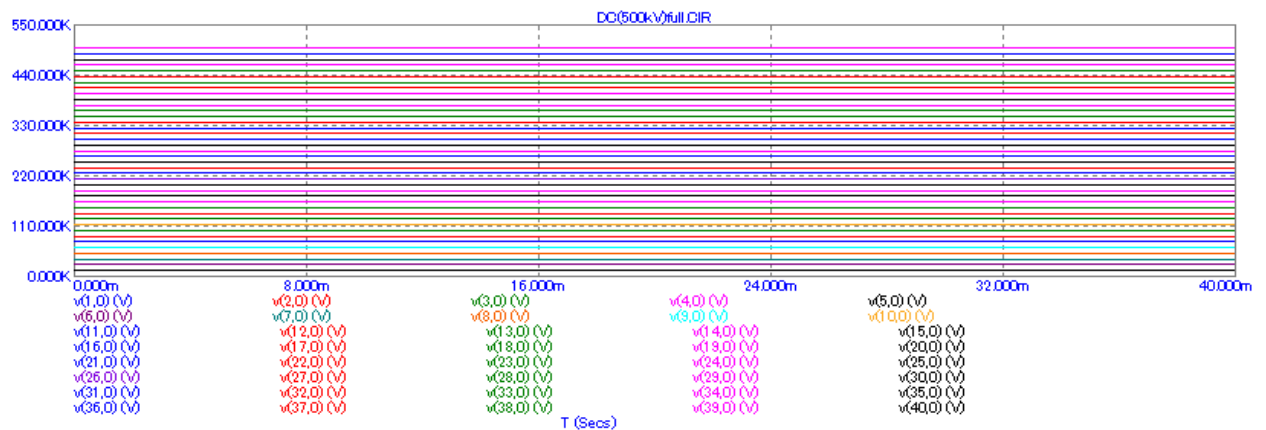


Рис. 3.44. Розподіл напруги по гірлянді ізоляторів.

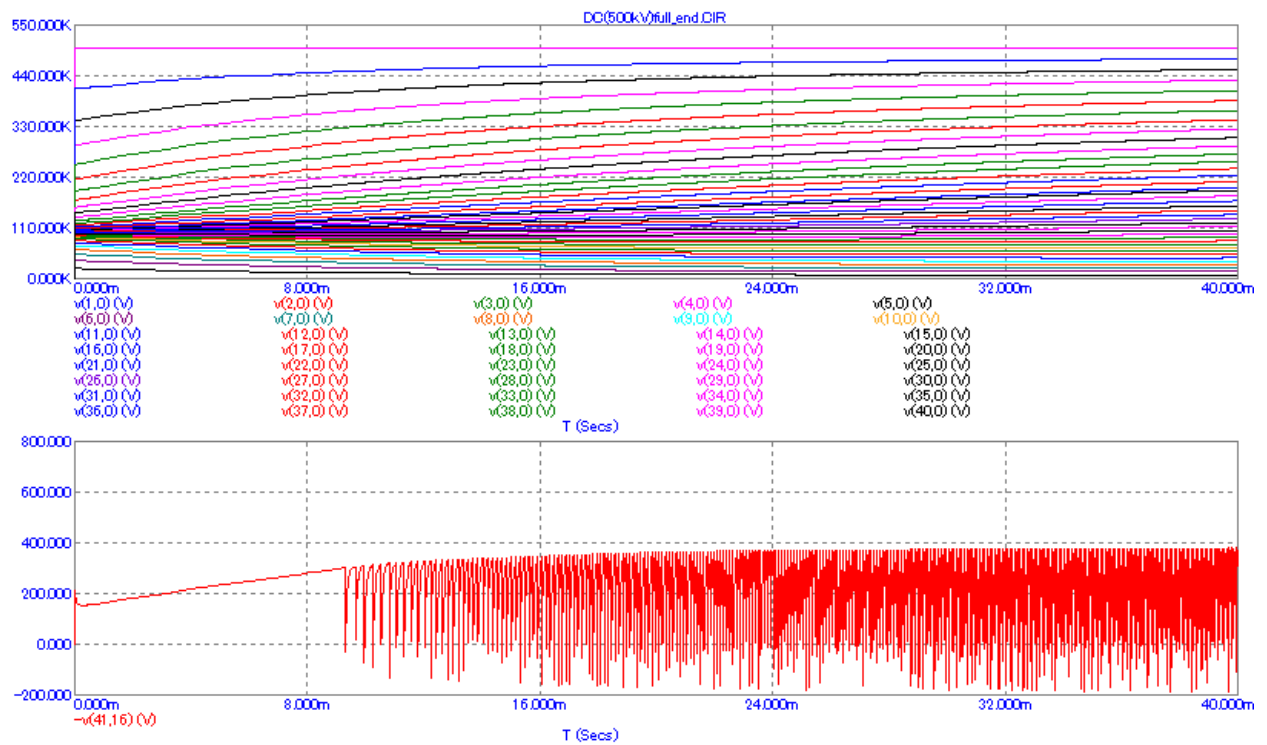


Рис. 3.45. Розподіл напруги по гірлянді з одним дефектним ізолятором (1), зміна напруги на пошкодженій ділянці (наявність ЧР) (2).

Таблиця 8
Падіння напруги на кожному ізоляторі гірлянди

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 500 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
1	12,5	2,50	22,03	4,406
2	12,5	2,50	17,18	3,436
3	12,5	2,50	13,40	2,680

Продовження таблиці 8

№ п/п	Напруга на ізоляторі гірлянди ЛЕП 500 кВ			
	Без ЧР		З ЧР	
	U, кВ	U, %	U, кВ	U, %
4	12,5	2,50	10,45	2,090
5	12,5	2,50	8,16	1,632
6	12,5	2,50	6,37	1,274
7	12,5	2,50	4,97	0,994
8	12,5	2,50	3,89	0,778
9	12,5	2,50	3,05	0,610
10	12,5	2,50	2,40	0,480
11	12,5	2,50	1,90	0,380
12	12,5	2,50	1,51	0,302
13	12,5	2,50	1,22	0,244
14	12,5	2,50	1,00	0,200
15	12,5	2,50	0,85	0,170
16	12,5	2,50	0,75	0,150
17	12,5	2,50	0,70	0,140
18	12,5	2,50	0,69	0,138
19	12,5	2,50	0,73	0,146
20	12,5	2,50	0,80	0,160
21	12,5	2,50	0,93	0,186
22	12,5	2,50	1,12	0,224
23	12,5	2,50	1,38	0,276
24	12,5	2,50	1,70	0,340
25	12,5	2,50	2,17	0,434
26	12,5	2,50	2,75	0,550
27	12,5	2,50	3,51	0,702
28	12,5	2,50	4,48	0,896
29	12,5	2,50	5,73	1,146
30	12,5	2,50	7,34	1,468
31	12,5	2,50	9,40	1,880
32	12,5	2,50	12,05	2,410
33	12,5	2,50	15,45	3,090
34	12,5	2,50	19,81	3,962
35	12,5	2,50	25,40	5,080
36	12,5	2,50	32,57	6,514
37	12,5	2,50	41,77	8,354
38	12,5	2,50	53,56	10,712
39	12,5	2,50	68,68	13,736
40	12,5	2,50	88,08	17,616

Модель часткових розрядів при постійному струмі відтворила відомий факт, що при чистих незабруднених, а також неушкоджених ізоляторах розподіл напруги вздовж гірлянди ізоляторів – рівномірний. А при появі забруднення або ушкодження хоча б одного з ізоляторів ця рівномірність суттєво порушується, при чому в значно більшому ступені ніж для змінного струму. Зокрема по цій причині в гірляндах ЛЕП постійного струму застосовується приблизно вдвічі більше ізоляторів ніж для еквівалентної напруги змінного струму.

3.6. Висновки по розділу 3

Створені імітаційні моделі часткових розрядів в ізоляції для змінного та постійного струму показали, що кількість часткових розрядів за одиницю часу на постійній напрузі приблизно в 1,3 рази більша ніж при змінній напрузі. Розраховані фільтри гасіння промислової частоти для схем реєстрації часткових розрядів в певній мірі виконали свою функцію, але найкраще для обох схем впорався Еліптичний фільтр. Вплив часткових розрядів на розподіл напруги по гірлянді ізоляторів для змінного струму помітний для ЛЕП середньої та високої напруги. Для надвисоких напруг наявність часткових розрядів в елементі гірлянди не внесла істотних змін. Чого не можна сказати про гірлянду ізоляторів ЛЕП постійного струму, наявність часткових розрядів в якій зумовила суттєве спотворення розподілу напруги по всіх довжині гірлянди.

4. СТАРТАП-ПРОЕКТ

4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Проблемами старіння діелектриків зараз займаються дуже інтенсивно. Це пов'язано з рядом причин. З одного боку, системи ізоляції, які були здані в експлуатацію 15-25 років тому, вже майже вичерпали свій ресурс. Їх своєчасна заміна – складне техніко-економічне завдання, що має спиратися на об'єктивний аналіз стану ізоляції та обґрунтування необхідності її заміни.

З іншого боку, останнім часом освоєні нові методи аналізу діелектриків, так звані апаратні методи, пов'язані із застосуванням складних технічних приладів та установок: хроматографічний аналіз, термогравіметрія, диференціальна сканувальна калориметрія, масоспектроскопія, спектроскопія електронного парамагнітного та ядерного магнітного резонансу. Порівняно з класичними методами ресурсних випробувань, нові апаратні методи дають можливість визначити ресурс діелектрика майже в шість разів швидше.

Унаслідок різноманітності та взаємного впливу різних механізмів старіння діелектрика визначення робочих напруженостей електричного поля, при яких забезпечується необхідний ресурс, являє собою надзвичайно складну проблему. Вона значно ускладнюється ще й тим, що ресурс τ (теплове старіння) – статистична характеристика, якій властивий дуже великий розкид, часто за межами одного порядку.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Запровадження фільтрів гасіння промислової частоти для схем реєстрації часткових розрядів. (Даний приклад може бути використаний для визначення характеристик та параметрів часткових розрядів у випадку їх наявності у високовольтному обладнанні)	1. Визначення наявності часткових розрядів ізоляції обладнання під час експлуатації (лінії електропередач, кабелі, електричне обладнання)	1. Контроль стану ізоляції силового обладнання
		2. Надійність електропостачання різних об'єктів
	2. Визначення параметрів часткових розрядів високовольтного обладнання	3. Зменшення затрат на аварійних ситуаціях та ремонті обладнання
		4. збільшення ресурсу електрообладнання

Проведемо порівняльний аналіз показників для власної ідеї із наявними на ринку конкурентами.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n/ n	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Кон- ку- рент1	Кон- ку- рент2	Кон- ку- рент3			+
1.	Цінова гнучкість	Модульни й детектор часткових розрядів	BAUR PDtAd 60	OWTS M28	CPDA- 15			+
2.	Наявність сертифікатів							+
3.	Змінні витрати							+
4.	Контроль якості							+
5.	Строк служби							+
6.	Габарити						+	
7.	Відповідність ГОСТ 2007-83 та ІЕС 60270:2000						+	
Загальний результат:						0	2	5

Під словом «Габарити» – мається на увазі затрати на перевезення обладнання для діагностики ВВ обладнання.

Змінні витрати – Можливість легкої модернізації даної установки, оскільки вона не являється модульною конструкцією (окремі прилади являються складовими установки, де є можливість заміни існуючих або додавання нових для удосконалення можливостей даної схеми)

Цінова гнучкість – не залежить від деталей окремих виробників, тому із підняттям цін є можливість використовувати більш дешеве обладнання (не заводський аналог-замінник), для економії, не втрачаючи ККД роботи самої схеми.

Строк служби обладнання в даному випадку як: слабкий показник – 10 років; нейтральний – 20 років; сильний показник – більше 25 років. Для власного проекту, дана установка використовує досить старе обладнання із строком служби близько 30 років, при цьому характеристики виміювань і їх якість не зменшують ККД роботи схеми. Оскільки кожна з установок являється старою, то і власне середній строк служби усієї установки можна вважати аналогічним. У випадку Конкурента 1-3, дані установки являються на половину модульними, де кожний з агрегатів зроблений для спільної роботи один з одним. Тому із заміною одної із компонентів схеми через більш швидке старіння чи аварію призведе до зменшення зносостійкості комплексного обладнання, а відповідно і зменшення строку служби.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Проведемо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових: Таблиця 8. Технологічна здійсненність ідеї проекту

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
	Детекція часткових розрядів високовольтного обладнання	Технологія 1 Вимірювання характеристик часткових розрядів за допомогою портативних електродів, з'єднаних до основи установки провідниками достатньої довжини для більшої зручності детекції у складнодоступних місцях промислових чи енергетичних об'єктів.	ГОСТ 20074-83	Дані стандарти як технологія виготовлення установки доступні усім і є одним з головних чинників вступу обладнання даного типу на ринок України
		Технологія 2 Вимірювання арактеристик часткових розрядів за допомогою стаціонарних електродів, як вимірювальної камери, для дослідження стану ізоляційних матеріалів у лабораторних умовах, що забезпечує більшу надійність та безпеку дослідження.	ІЕС 60270:2000	
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Було проведення визначення можливостей, що можна використати під час ринкового впровадження проекту та ринкових загроз, які можуть перешкоджати реалізації даного проекту.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	30% основного ринку України
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнація ринку
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	13%

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Необхідність детекції часткових розрядів у високовольтному обладнанні, визначення їх параметрів та характеристик	Компанії з виготовлення високовольтного обладнання, які пропонують послуги монтажу, ремонту та діагностики стану ізоляції обладнання	1. Економічність протиставляючи необхідності отримання повного пакету послуг	1. Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання (щадящая диагностика)
			2. Отримання повного пакету послуг незалежно від цінової політики	2. Можливість комплексної діагностики
			3. Цільове використання	3. Широкий спектр досліджуваних параметрів
			4. Термін отримання обладнання після його купівлі з надійною його поставкою	4. Мобільність
				5. Відношення: ціна - якість
				6. Експлуатація в будь-яких умовах
2.	Дослідження характеристик та параметрів часткових розрядів	Приватні чи державі наукові лабораторії, що займаються виготовленням чи дослідженням компонент високовольтного обладнання	1. Економічність протиставляючи необхідності отримання повного пакету послуг з урахуванням можливості самостійного удосконалення установки чи її окремих складових	1. Широкий спектр досліджуваних параметрів
			2. Термін отримання обладнання після його купівлі з надійною його поставкою	2. Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання
			3. Незмінне значення похибки вимірювань, незалежно від строку служби обладнання	3. Зручність отримання або виведення результатів дослідження

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Установка, компонентами якої являється застаріле обладнання, оскільки вітчизняні остачальники працюють на старих технологіях	Виготовлення приладів невідповідної якості	Пошук на ринку аналогів-замінників з ідентичними або схожими параметрами
2.	Розробка обладнання з новітньою технологією	Швидка та якісніша оцінка параметрів ширшого спектру	Удосконалення властивостей/компонент обладнання з незначним ціновим зростанням, але меншим від ціни конкурентів
3.	Маркетинговий ризик	Неефективний підбір відповідних маркетингових стратегій пропагування та впровадження установки	Пошук постачальників з більш низькими цінами
4.	Непередбачувані зміни вартості основних компонентів обладнання	Ріст витрат, зниження КСП*	Вихід на іноземний ринок
5.	Зміна ринкових обставин як девальвація та інфляція; політичних обставин як прийняття закону про зобов'язання використовувати лише вітчизняне обладнання	Різка зміна курсу долара/євро чи іншої конкурентної валюти;	Знаходження постачальників вітчизняного обладнання
6.	Припинення фінансування Європою зеленого тарифу	Зменшення попиту на обладнання діагностики високовольтних установок	

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Підвищення КСП у зв'язку з появою Європейських інвесторів	Збільшення попиту на ринку	Інтенсивна комунікація з потенційними клієнтами
2.	Бурхливий розвиток зеленої енергетики		Моніторинг ринку та захоплення потенційних клієнтів
3.	Створення іноземними компаніями наукових лабораторій		Моніторинг наявності відповідних грантів та проектів
4.	Створення національного прозорого фонду досліджень		Інтенсифікація збутових зусиль в державному секторі

Аналіз пропозиції: визначення загальних рис конкуренції на ринку

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Монополістична конкуренція	Відносно велика кількість невеликих виробників пропонують схоже, але не ідентичне обладнання	Створення установки, яка буде придатна для більш широкого спектру досліджень Зниження ціни не меншу 110% від собівартості обладнання
2. локальний за рівнем конкурентної боротьби	Обладнання схожого типу зустрічається тільки на ринку України (більш розвинені країни використовують більш розвинені технології)	Орієнтація на місцевих клієнтів
3. Електротехнічна промисловість	Дана установка призначена тільки для діагностики стану високовольтного електротехнічного обладнання, або обладнання, що має характерні ознаки	Використання прямого маркетингу
4. Видова конкуренція	Продукція має одне й те саме призначення, але існують суттєві відмінності у параметрах	Розвивати фактори КСП орієнтовані на вітчизняного виробника
5. Цінова	Вигідніші умови реалізації за рахунок маніпуляцій з вартістю комплектуючого обладнання. Наявне незначне збільшення вартості установки за рахунок використання більш якісного, на думку споживача, комплектуючого обладнання	Використати фактор низьких цін у просуванні на ринку

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	На даний момент немає	Високі витрати на перекриття, унікальність продажу, стратегічна значимість	Цінова гнучкість	Ціна та прилади
<u>Висновки:</u>	Розвиток КСП як: <ul style="list-style-type: none"> • цінова гнучкість • наявність сертифікатів • змінні витрати • контроль якості • габарити 	немає	Підтримка Довгострокових відносин	Підтримка цінової КСП	Підтримка цінової КСП

Висновки

1. Беручи до уваги конкурентноспроможність на ринку як цінова гнучкість, наявність сертифікатів, змінні витрати, контроль якості та габарити компанія має непогану можливість існування на ринку.

2. Для того щоб конкурентноспроможним на ринку необхідно інтенсивна комунікація з потенційними клієнтами, постійний моніторинг ринку та захоплення потенційних клієнтів, моніторинг наявності відповідних грантів та проектів, а також шукати шляхи інтенсивного збуту в державному секторі

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Цінова гнучкість	Не залежить від деталей окремих виробників, тому із підняттям цін є можливість використовувати більш дешеве обладнання (не заводський аналог-замінник), для економії, не втрачаючи ККД роботи самої схеми
2.	Наявність сертифікатів	Покупці вважають за краще купувати саме ту продукцію, яка володіє документальним підтвердженням якості, а таким документом є сертифікат. Таким чином наявність сертифікату збільшує конкурентоспроможність та попит на ринку.
3.	Змінні витрати	Можливість легкої модернізації даної установки, оскільки вона не являється модульною конструкцією (окремі прилади являються складовими установки, де є можливість заміни існуючих або додавання нових для удосконалення можливостей даної схеми)
4.	Контроль якості	За рахунок контролю якості, дана установка відповідає конкретним вимогам замовників (покупців) і є надійною, задовільною і стійкою у фінансовому відношенні.
5.	Строк служби	Установка має можливість заміни будь-якої компоненти на нову, без врахування середньої зносостійкості обладнання, за рахунок її модульності. Таким чином із заміною однієї із компонент на нову чи більш нову б/у строк служби збільшуватиметься.
6.	Габарити	Дана установка являється малогабаритною, тому витрати на її перевезення в порівнянні з габаритним обладнанням будуть економічніші.
7.	Відповідність ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000	

Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін „назва проекту”

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Цінова гнучкість			B	O,C				
2.	Наявність сертифікатів		C	O	B				
3.	Змінні витрати			B,O	C				
4.	Контроль якості				B,O,C				
5.	Строк служби			O,C	B				
6.	Габарити				B		O,C		
7.	Відповідність ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000			C	O		B		
де B – BAUR PD-TaD 60; O – OWTS M28; C – CPDA-15									

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> <ul style="list-style-type: none"> Цінова гнучкість Наявність сертифікатів Змінні витрати Контроль якості Строк служби 	<u>Слабкі сторони:</u> <p>В перспективі очікується обмеження попиту в державному/недержавному секторі</p>
<u>Можливості:</u> <ul style="list-style-type: none"> Підвищення КСП у зв'язку з появою Європейських інвесторів Бурхливий розвиток зеленої енергетики Створення іноземними компаніями наукових лабораторій Створення національного прозорого фонду Законодавче обмеження щодо купівлі іноземних розробок за наявності вітчизняних аналогів 	<u>Загрози:</u> <ul style="list-style-type: none"> Установка, компонентами якої являється застаріле обладнання Обладнання з новітньою технологією Маркетинговий ризик Непередбачувані зміни вартості основних компонентів обладнання Зміна ринкових або політичних обставин Припинення фінансування Європою зеленого тарифу

Альтернативи ринкової поведінки

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Зосередження на держсектори, залучення державних грантів	Середня	Протягом року
2.	Вихід на приватні лабораторії із пропозицією спільного виробництва за рахунок їх інвестицій	Низька, оскільки, скоріш за все мають іноземних постачальників	Протягом півроку
3.	Пошук інвестора для виробництва та реалізації за кордоном	Низька	Протягом року
4.	Вихід на сегмент вітчизняних компаній з виготовлення обладнання (СП) або продаж їм ідеї приладу (потрібно запатентувати)	Середня	Протягом 2,5-3 років (розгляд заявок на патентування займає 1,5-2 роки).

Як результат була обрана альтернатива 1 – зосередження на держсектори, залучення державних грантів, через середню ймовірність отримання ресурсів з строком реалізації протягом року.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Зосередження на держсектори, залучення державних грантів	Середня	З урахуванням розвитку наукових лабораторій очікується зростання попиту	Більшість існуючих на ринку конкурентів не відповідають необхідним характеристикам для проведення досліджень, тобто зосереджені лише на виявлення наявності дефектів у обладнанні	Оскільки дана установка володіє більшістю необхідних характеристик, які потребують дослідні установки, вхід до сегменту очікується середнім (присутня можливість того, що якщо лабораторії будуть не суто державними, вони матимуть можливість обрати обладнання виробника- лідера)
<p><u>Які цільові групи обрано:</u> Цільові групи вчених, що працюють у різних науково-дослідних підрозділах</p>					

Формування базової стратегії розвитку

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Зосередження на держсектори, залучення державних грантів	Концентрований маркетинг	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості	Лідерство за витратами

Вибір стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Даний проект є першопрохідцем на ринку, де існують схожі проекти, але з деякими відмінними властивостями	Забираючи існуючих у конкурентів споживачів слід очікувати, що за тобою крок у крок буде йти постійне порівняння компаній, якості товару та ціни. Відповідно, у моменти, коли та чи інша компанія буде у чомусь програвати, споживачі будуть переходити від одної компанії до іншої. Пошук нових споживачів займе досить тривалий час, але знайшовши їх існуватиме деяка захищеність по відношенню до рентабельності компанії. Таким чином для маленької компанії краще обрати другий варіант, але і не випускати із огляду перший	Ні. Оскільки по відношенню до такої установки недоцільно використовувати слово копіювати. Якщо деякі характеристики обладнання будуть обмежуватись наявними параметрами чи характеристиками її компонент, і вони будуть мати однакові характеристики, це не можна вважати копіюванням.	В перший період існування маленької компанії важко застосувати стратегію лідера, тим більш не маючи достатнього досвіду існування на ринку і відповідно ресурсів. В такому випадку краще піти в вузьку спеціалізацію, зайняти декілька сегментів ринку та базуватися на удосконаленні унікальних характеристик продукції. (стратегія нішера).

Розробка стратегії позиціонування, формування ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1.	Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання (щадящая диагностика)	Лідерство по витримці	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості	Економність
2.	Можливість комплексної діагностики			Простота в експлуатації
3.	Широкий спектр досліджуваних параметрів			
4.	Мобільність			
5.	Експлуатація в будь-яких умовах			Вітчизняне (виходячи на державні лабораторії, де основним пріоритетом є вітчизняне обладнання)
6.	ручність отримання або виведення результатів дослідження			

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Формування *маркетингової концепції товару*. Підсумок результатів попереднього аналізу конкурентоспроможності товару

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	<p>1. Необхідність детекції часткових розрядів у високовольтному обладнанні, визначення їх параметрів та характеристик</p> <p>2. Дослідження характеристик та параметрів часткових розрядів</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Цінова гнучкість • Наявність сертифікатів • Змінні витрати • Контроль якості • Строк служби 	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості.

Розробка трирівневої маркетингової моделі товару

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Габарити		Пр/Тх
	2. Вага		Тх
	3. Кількість одиниць		Вр
	Якість: ГОСТ 20074-83; ІЕС 60270:2000		
	Пакування: Ящик пластмасовий у більбашковому поліетилені (зовнішнє), бульбашкова поліетиленова плівка, спеціальний скоч для кріплення мілких деталей (внутрішня)		
III. Товар із підкріпленням	Марка: PD-D 8/220		
	Назва організації «PD-Detec (PD-D)»		
	Назва товару «PD-D 8/220»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу		
	Після продажу		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент на корисну модель			

Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1.	Товари замінники відсутні	110 тис. грн.	20 тис. грн.	80 тис. грн.

Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ n/n	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Наявний закупівельний центр, колегіальне прийняття рішення	Проведення переговорів, укладання контакту, транспортування, перевірка якості транспортування та роботи обладнання при його експлуатації	Нульовий рівень, прямий збут	Власний торговий представник, або власний відділ збуту

Розробка концепції маркетингових комунікацій

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ n/n	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Прийняття професіонального та раціонального рішення	Галузеві виставки, електронні торговельні майданчики, галузеві видання	немає	Переконати у цілеспрямованості придбання економічного вітчизняного приладу	Дати свій слоган, наприклад «Не все те неякісне, що дешеве»

4.6. Висновки до розділу 4

1. Метою стартап-проекту було формування іноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатності оцінювати ринкові перспективи комерціалізації науково-технічних розробок розробленої у розділі 3 магістерської дисертації.

2. Для досягнення цієї мети було:

1) описано ідею проекту;

2) проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідкю проекту (технології створення товару);

3) визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

4) розробка ринкової стратегії проекту;

5) розробка маркетингової програми стартап-проекту.

3. Результати дослідження показали, що дана установка має середні можливості існування на ринку, з рентабельністю близько 10%. Оскільки в даний час відбувається інтенсивний розвиток наукових спеціалізованих лабораторій, а також лабораторій при компаніях-розробниках ізоляційних матеріалів, на ринку є перспектива існування даного товару. Для ринкової реалізації була обрана альтернатива лідерства по витратам.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації проведено загальний огляд існуючих моделей вимірювання часткових розрядів в діагностиці ізоляції електрообладнання, розглянуто питання моделювання часткових розрядів за методиками кафедри теоретичної електротехніки та виконано вимірювання характеристик часткових розрядів в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки.

Було створено імітаційні моделі часткових розрядів в ізоляції для змінного та постійного струму показали, що кількість часткових розрядів за одиницю часу на постійній напрузі приблизно в 1,3 рази більша ніж при змінній напрузі. Розраховані фільтри гасіння промислової частоти для схем реєстрації часткових розрядів в певній мірі виконали свою функцію, але найкраще для обох схем впорався Еліптичний фільтр. Вплив часткових розрядів на розподіл напруги по гірлянді ізоляторів для змінного струму помітний для ЛЕП середньої та високої напруги. Для надвисоких напруг наявність часткових розрядів в елементі гірлянди не внесла істотних змін. Чого не можна сказати про гірлянду ізоляторів ЛЕП постійного струму, наявність часткових розрядів в якій зумовила суттєве спотворення розподілу напруги по всіх довжині гірлянди.

Діагностична система показала високу ефективність при вирішенні завдань раннього виявлення дефектів високовольтного обладнання; прогнозування розвитку дефектів, оцінки їх небезпеки; визначення обсягу ремонтно-відновлювальних робіт; оптимізації ремонтно-технічного обслуговування обладнання.

Додаток А

SPICE-код імітаційної моделі схеми реєстрації часткових розрядів при змінному струмі. Приєднання включені в коло заземлення з'єднувального конденсатора (рис. 3.10.1)

C:\Program Files (x86)\AC\AC(2, lamp)end2B_Ell.CIR Transient Analysis

* Converted From Micro Cap Source file to MCAPSPICE

*

C1 8 9 194.51313U

C2 8 3 5.71894U

C3 4 8 5.71894U

C42 2 3 75E-12

C43 6 0 15E-12

C45 2 7 1E-12

C46 2 0 60E-12

C47 7 0 6E-12

E2 1 0 VALUE = {5000*SIN(2*3.14159265358979323846*50*TIME) }

L1 9 0 68.68274M

R43 0 6 50

R44 6 0 1E6

R45 1 2 1E4

R46 0 7 100E6

R47 7 2 60E6

R48 0 2 100E6

T4 6 0 5 0 Z0=50 TD=10000N

X12 4 5 AMP PARAMS: GAIN=5

X13 3 0 SNUBBER PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U

X14 0 3 SNUBBER PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U

X15 7 0 SPARKGAP

+PARAMS: VTHRES=300 VARC=50 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=1N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P

*

*

.SUBCKT AMP PINA PINB PARAMS: GAIN=1

```

E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
RE1 PINA 0 1G;added by E1
.ENDS AMP
*
*
.SUBCKT SNUBBER CATHODE ANODE PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U
C1 3 CATHODE {CSNUB}
D1 ANODE CATHODE DSNUB
R1 ANODE 3 {RSNUB}
.MODEL DSNUB D (RS=10M TT=1N CJO=100P)
.ENDS SNUBBER
*
*
.SUBCKT SPARKGAP PIN1 PIN2
+PARAMS: VTHRES=90 VARC=10 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=130N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P

C1 Pin1 Pin2 {CPAR}
C2 Pin1 Switch {CARC}
C3 Switchchk 0 10P
C4 13 Dif 1U
D1 6 5 DCLAMP
D2 6 Switch DCLAMP
E2 8 0 VALUE =
{IF(ABS(V(PIN1,PIN2))>V(THRESH),10,IF(ABS(I(V1))>{ISUS},10,10N))}
E3 Thresh 0 VALUE = {{VTHRES}}+({VTHRES}*V(ION))}
E4 Ion 0 TABLE {V(12,0)} = (0,0) (1U,.5565M) (10M,1M) (100M,86M) (1,217M)
+ (10,521M) (100,956M)
E5 13 0 VALUE = {V(PIN1,PIN2)}
E6 14 0 VALUE = {-100MEG*V(DIF)}
E8 Dvdt 0 VALUE = {100*V(DIF)}
E9 12 0 VALUE = {ABS(V(DVDT))}
G1 Switch Pin2 VALUE = {V(SWITCH,PIN2)*V(SWITCHCHK)}
L1 2 3 {LPL}
R1 3 2 {RPL}
R2 Pin2 Pin1 10MEG

```

```

R3 5 3 {RNEG}

R4 Switch Pin2 1E10

R5 8 Switchchk 10

R6 14 Dif 1MEG

RE4 12 0 1G;added by E4

V1 Pin1 2 0

.MODEL DCLAMP D (BV={VARC})

.ENDS SPARKGAP

*

.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u DEFW=100u
DEFNRD=0

+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K DIGERRDEFAULT=20
DIGERRLIMIT=0

+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2 DIGMNTYSCALE=0.4
DIGOVRDRV=3

+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=250 ITL2=50 ITL4=50 PIVREL=1 PIVTOL=.1p
RELTOL=1m

+ SD=2.58 SEED=0 TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80 PRIVATEANALOG
PERFORM_M=2

+ RMIN=1u R_NODE_GND=1e12 CSHUNT=0 RSHUNT=0 RP_FOR_ISOURCE=0 METHOD=TRAP

*

.LIB "C:\Program Files (x86)\mc9g\library\NOM.LIB"

*

.TEMP 27

*

.TRAN 0.0008 0.04 0

.PRINT TRAN V(1,0) V(7,0)

.PLOT TRAN V(1,0) V(7,0)

.PRINT TRAN (-V(6,0))

.PLOT TRAN (-V(6,0))

*

.END

```

Додаток Б

SPICE-код імітаційної моделі схеми реєстрації часткових розрядів при змінному струмі. Приєднання включені в коло заземлення об'єкта випробувань (рис. 3.11.1)

```

C:\Program Files (x86)\AC\AC(2, lamp)end2A_Ell.CIR Transient Analysis
* Converted From Micro Cap Source file to MCAPSPICE
*
C1 8 9 194.51313U
C2 8 2 5.71894U
C3 4 8 5.71894U
C42 3 0 75E-12
C43 6 0 15E-12
C45 3 7 1E-12
C46 3 2 60E-12
C47 7 2 6E-12
E2 1 2 VALUE = {5000*SIN(2*3.14159265358979323846*50*TIME)}
L1 9 0 68.68274M
R43 0 6 50
R44 6 0 1E6
R45 1 3 1E4
R46 2 7 100E6
R47 7 3 60E6
R48 2 3 100E6
T4 6 0 5 0 Z0=50 TD=10000N
X12 4 5 AMP PARAMS: GAIN=5
X13 2 0 SNUBBER PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U
X14 0 2 SNUBBER PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U
X15 7 2 SPARKGAP
+PARAMS: VTHRES=300 VARC=50 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=4N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P
*
*
.SUBCKT AMP PINA PINB PARAMS: GAIN=1

```

```

E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
RE1 PINA 0 1G;added by E1
.ENDS AMP
*
*
.SUBCKT SNUBBER CATHODE ANODE PARAMS: RSNUB=1000 CSNUB=.1U
C1 3 CATHODE {CSNUB}
D1 ANODE CATHODE DSNUB
R1 ANODE 3 {RSNUB}
.MODEL DSNUB D (RS=10M TT=1N CJO=100P)
.ENDS SNUBBER
*
*
.SUBCKT SPARKGAP PIN1 PIN2
+PARAMS: VTHRES=90 VARC=10 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=130N RPL=2K

CPAR=1P CARC=3P
C1 Pin1 Pin2 {CPAR}
C2 Pin1 Switch {CARC}
C3 Switchchk 0 10P
C4 13 Dif 1U
D1 6 5 DCLAMP
D2 6 Switch DCLAMP
E2 8 0 VALUE =
{ IF (ABS (V (PIN1,PIN2)) > V (THRESH) , 10, IF (ABS (I (V1)) > { ISUS } , 10, 10N) ) }
E3 Thresh 0 VALUE = {{VTHRES}+({VTHRES}*V(ION))}
E4 Ion 0 TABLE {V(12,0)} = (0,0) (1U,.5565M) (10M,1M) (100M,86M) (1,217M)
+ (10,521M) (100,956M)
E5 13 0 VALUE = {V(PIN1,PIN2)}
E6 14 0 VALUE = {-100MEG*V(DIF)}
E8 Dvdt 0 VALUE = {100*V(DIF)}
E9 12 0 VALUE = {ABS(V(DVDT))}
G1 Switch Pin2 VALUE = {V(SWITCH,PIN2)*V(SWITCHCHK)}
L1 2 3 {LPL}
R1 3 2 {RPL}

```

```

R2 Pin2 Pin1 10MEG
R3 5 3 {RNEG}
R4 Switch Pin2 1E10
R5 8 Switchchk 10
R6 14 Dif 1MEG
RE4 12 0 1G;added by E4
V1 Pin1 2 0

.MODEL DCLAMP D (BV={VARC})

.ENDS SPARKGAP

*

.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u DEFW=100u
DEFNRD=0

+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K DIGERRDEFAULT=20
DIGERRLIMIT=0

+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2 DIGMNTYSCALE=0.4
DIGOVRDRV=3

+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=250 ITL2=50 ITL4=50 PIVREL=1 PIVTOL=.1p
RELTOL=1m

+ SD=2.58 SEED=0 TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80 PRIVATEANALOG
PERFORM_M=2

+ RMIN=1u R_NODE_GND=1e12 CSHUNT=0 RSHUNT=0 RP_FOR_ISOURCE=0 METHOD=TRAP

*

.LIB "C:\Program Files (x86)\mc9g\library\NOM.LIB"

*

.TEMP 27

*

.TRAN 0.0008 0.04 0

.PRINT TRAN V(1,2) V(7,0)

.PLOT TRAN V(1,2) V(7,0)

.PRINT TRAN V(6,0)

.PLOT TRAN V(6,0)

*

.END

```

Оскільки для схем на рисунках 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 SPICE-код є аналогічним, тому для зменшення превантаження пояснювальної записки текстовим матеріалом не наведений тут.

ДОДАТОК В

SPICE-код імітаційної моделі схеми реєстрації часткових розрядів в гірлянді ізоляторів ЛЕП змінного струму 500 кВ (рис. 3.37)

C:\Program Files (x86)\AC\AC(500 kV)full_end.CIR Transient Analysis

* Converted From Micro Cap Source file to MCAPSPICE

*

C5 9 10 60E-12

C6 10 11 60E-12

C7 1 2 60E-12

C11 3 4 60E-12

C12 4 5 60E-12

C13 5 6 60E-12

C15 0 10 3E-12

C16 0 11 3E-12

C17 0 2 3E-12

C18 0 7 3E-12

C19 0 8 3E-12

C20 0 3 3E-12

C21 0 4 3E-12

C22 0 5 3E-12

C23 5 6 0.75E-12

C24 4 6 0.75E-12

C25 3 6 0.75E-12

C26 8 6 0.75E-12

C27 7 6 0.75E-12

C28 2 6 0.75E-12

C29 11 6 0.75E-12

C30 10 6 0.75E-12

C32 2 7 60E-12

C33 8 3 60E-12

C34 0 12 60E-12

C35 13 14 60E-12

C36 14 15 60E-12
C37 15 16 60E-12
C38 0 12 3E-12
C39 0 14 3E-12
C40 0 15 3E-12
C41 0 16 3E-12
C42 0 9 3E-12
C43 9 6 0.75E-12
C44 16 6 0.75E-12
C45 15 6 0.75E-12
C46 14 6 0.75E-12
C47 12 6 0.75E-12
C48 16 9 60E-12
C49 12 13 60E-12
C50 0 13 3E-12
C51 13 6 0.75E-12
C52 7 8 60E-12

C53 11 17 60E-12
C55 0 17 3E-12
C58 17 6 0.75E-12
C62 0 1 3E-12
C63 1 6 0.75E-12
C67 18 1 60E-12
C68 20 26 1E-12
C69 20 21 60E-12
C70 19 20 60E-12
C72 0 20 3E-12
C73 0 21 3E-12
C74 21 6 0.75E-12
C75 20 6 0.75E-12
C76 17 22 60E-12
C77 22 23 60E-12
C78 23 24 60E-12
C79 0 22 3E-12

```
C80 0 23 3E-12
C81 0 24 3E-12
C82 0 19 3E-12
C83 19 6 0.75E-12
C84 24 6 0.75E-12
C85 23 6 0.75E-12
C86 22 6 0.75E-12
C87 24 19 60E-12
C89 21 25 60E-12
C90 25 18 60E-12
C91 0 25 3E-12
C92 0 18 3E-12
C93 18 6 0.75E-12
C94 25 6 0.75E-12
C95 26 21 6E-12
E2 6 0 VALUE =
{500000/SQRT(3)*SQRT(2)*SIN(2*3.14159265358979323846*50*TIME) }
R8 10 9 100E6
R9 11 10 100E6
R10 2 1 100E6
R13 4 3 100E6
R14 5 4 100E6
R15 6 5 100E6
R17 10 0 10E15
R18 11 0 10E15
R19 2 0 10E15
R20 7 0 10E15
R21 8 0 10E15
R22 3 0 10E15
R23 4 0 10E15
R24 5 0 10E15
R25 6 5 10E15
R26 6 4 10E15
R27 6 3 10E15
R28 6 8 10E15
```

R29 6 7 10E15

R30 6 2 10E15

R31 6 11 10E15

R32 6 10 10E15

R34 7 2 100E6

R35 3 8 100E6

R36 12 0 100E6

R37 14 13 100E6

R38 15 14 100E6

R39 16 15 100E6

R40 12 0 10E15

R41 14 0 10E15

R42 15 0 10E15

R43 16 0 10E15

R44 9 0 10E15

R45 6 9 10E15

R46 6 16 10E15

R47 6 15 10E15

R48 6 14 10E15

R49 6 12 10E15

R50 9 16 100E6

R51 13 12 100E6

R52 13 0 10E15

R53 6 13 10E15

R54 8 7 100E6

R55 17 11 100E6

R57 17 0 10E15

R60 6 17 10E15

R64 1 0 10E15

R65 6 1 10E15

R69 1 18 100E6

R70 21 26 100E6

R71 26 20 90E6

R72 21 20 100E6

R73 20 19 100E6

R75 20 0 10E15

R76 21 0 10E15

R77 6 21 10E15

R78 6 20 10E15

R79 22 17 100E6

R80 23 22 100E6

R81 24 23 100E6

R82 22 0 10E15

R83 23 0 10E15

R84 24 0 10E15

R85 19 0 10E15

R86 6 19 10E15

R87 6 24 10E15

R88 6 23 10E15

R89 6 22 10E15

R90 19 24 100E6

R92 25 21 100E6

R93 18 25 100E6

R94 25 0 10E15

R95 18 0 10E15

R96 6 18 10E15

R97 6 25 10E15

X10 26 21 SPARKGAP

+PARAMS: VTHRES=300 VARC=50 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=10N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P

*

*

.SUBCKT SPARKGAP PIN1 PIN2

+PARAMS: VTHRES=90 VARC=10 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=130N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P

C1 Pin1 Pin2 {CPAR}

C2 Pin1 Switch {CARC}

C3 Switchchk 0 10P

C4 13 Dif 1U

```

D1 6 5 DCLAMP
D2 6 Switch DCLAMP
E2 8 0 VALUE =
{ IF (ABS (V (PIN1,PIN2)) > V (THRESH), 10, IF (ABS (I (V1)) > { ISUS }, 10, 10N) ) }
E3 Thresh 0 VALUE = { {VTHRES} + ({VTHRES} * V (ION)) }
E4 Ion 0 TABLE {V(12,0)} = (0,0) (1U,.5565M) (10M,1M) (100M,86M) (1,217M)
+ (10,521M) (100,956M)
E5 13 0 VALUE = {V(PIN1,PIN2)}
E6 14 0 VALUE = {-100MEG * V (DIF) }
E8 Dvdt 0 VALUE = {100 * V (DIF) }
E9 12 0 VALUE = {ABS (V (DVDT)) }
G1 Switch Pin2 VALUE = {V (SWITCH,PIN2) * V (SWITCHCHK) }
L1 2 3 {LPL}
R1 3 2 {RPL}
R2 Pin2 Pin1 10MEG
R3 5 3 {RNEG}
R4 Switch Pin2 1E10
R5 8 Switchchk 10
R6 14 Dif 1MEG
RE4 12 0 1G;added by E4
V1 Pin1 2 0
.MODEL DCLAMP D (BV={VARC})
.ENDS SPARKGAP
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u DEFW=100u
DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K DIGERRDEFAULT=20
DIGERRLIMIT=0
+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2 DIGMNTYSCALE=0.4
DIGOVRDRV=3
+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=250 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1 PIVTOL=.1p
RELTOL=1m
+ SD=2.58 SEED=0 TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80 PRIVATEANALOG
PERFORM_M=2
+ RMIN=1u R_NODE_GND=1e12 CSHUNT=0 RSHUNT=0 RP_FOR_ISOURCE=0 METHOD=TRAP
*
```

```

.LIB "C:\Program Files (x86)\mc9g\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.TRAN 0.0008 0.04 0
.PRINT TRAN V(1,0) V(2,0) V(3,0) V(4,0) V(5,0) V(6,0) V(7,0) V(8,0)
V(9,0)
+ V(10,0) V(11,0) V(12,0) V(13,0) V(14,0) V(15,0) V(16,0) V(17,0) V(18,0)
+ V(19,0)
+ V(20,0) V(21,0) V(22,0) V(23,0) V(24,0) V(25,0)
.PLOT TRAN V(1,0) V(2,0) V(3,0) V(4,0) V(5,0) V(6,0) V(7,0) V(8,0) V(9,0)
+ V(10,0) V(11,0) V(12,0) V(13,0) V(14,0) V(15,0) V(16,0) V(17,0) V(18,0)
+ V(19,0)
+ V(20,0) V(21,0) V(22,0) V(23,0) V(24,0) V(25,0)
.PRINT TRAN (-V(26,21))
.PLOT TRAN (-V(26,21))
*
.END

```

Оскільки для схем на рисунках 3.22, 3.25, 3.28, 3.31, 3.34, 3.40 SPICE-код є аналогічним (відрізняється лише кількістю ізоляторів та напругою), тому для зменшення превантаження пояснювальної записки текстовим матеріалом не наведений тут.

ДОДАТОК Г

**SPICE-код імітаційної моделі схеми реєстрації часткових розрядів в
гірлянді ізоляторів ЛЕП постійного струму ± 500 кВ (рис. 3.43)**

```
C:\Program Files (x86)\DC\DC(500kV)full_end.CIR Transient Analysis
* Converted From Micro Cap Source file to MCAPSPICE
*
```

```
C153 1 2 60E-12
C154 2 3 60E-12
C155 0 2 3E-12
C156 0 3 3E-12
C157 3 4 0.75E-12
C158 2 4 0.75E-12
C159 0 5 60E-12
C160 6 7 60E-12
C161 7 8 60E-12
C162 8 9 60E-12
C163 0 5 3E-12
C164 0 7 3E-12
C165 0 8 3E-12
C166 0 9 3E-12
C167 0 1 3E-12
C168 1 4 0.75E-12
C169 9 4 0.75E-12
C170 8 4 0.75E-12
C171 7 4 0.75E-12
C172 5 4 0.75E-12
C173 9 1 60E-12
C174 5 6 60E-12
C175 0 6 3E-12
C176 6 4 0.75E-12
C177 3 10 60E-12
C178 0 10 3E-12
C179 10 4 0.75E-12
C180 11 12 60E-12
C181 0 12 3E-12
C182 0 13 3E-12
C183 13 4 0.75E-12
C184 12 4 0.75E-12
C185 14 15 60E-12
C187 16 17 60E-12
C188 0 15 3E-12
C189 0 16 3E-12
C190 0 17 3E-12
C191 0 11 3E-12
C192 11 4 0.75E-12
C193 17 4 0.75E-12
C194 16 4 0.75E-12
C195 15 4 0.75E-12
C196 13 18 60E-12
```


C197 18 19 60E-12
C198 0 18 3E-12
C199 0 19 3E-12
C200 19 4 0.75E-12
C201 18 4 0.75E-12
C202 12 13 60E-12
C203 20 21 60E-12
C204 0 20 3E-12
C205 0 21 3E-12
C206 0 14 3E-12
C207 14 4 0.75E-12
C208 21 4 0.75E-12
C209 20 4 0.75E-12
C210 21 14 60E-12
C211 22 20 60E-12
C212 10 23 60E-12
C213 0 23 3E-12
C214 23 4 0.75E-12
C215 24 25 60E-12
C216 0 25 3E-12
C217 0 26 3E-12
C218 26 4 0.75E-12
C219 25 4 0.75E-12
C220 27 28 60E-12
C221 28 29 60E-12
C222 29 30 60E-12
C223 0 28 3E-12
C224 0 29 3E-12
C225 0 30 3E-12
C226 0 24 3E-12
C227 24 4 0.75E-12
C228 30 4 0.75E-12
C229 29 4 0.75E-12
C230 28 4 0.75E-12
C231 30 24 60E-12
C232 26 31 60E-12
C233 31 22 60E-12
C234 0 31 3E-12
C235 0 22 3E-12
C236 22 4 0.75E-12
C237 31 4 0.75E-12
C238 25 26 60E-12
C239 0 27 3E-12
C240 27 4 0.75E-12
C241 23 27 60E-12
C242 32 33 60E-12
C243 34 35 60E-12
C244 35 36 60E-12
C245 36 4 60E-12
C246 0 33 3E-12
C247 0 37 3E-12
C248 0 38 3E-12
C249 0 34 3E-12

C250 0 35 3E-12

```
C251 0 36 3E-12
C252 36 4 0.75E-12
C253 35 4 0.75E-12
C254 34 4 0.75E-12
C255 38 4 0.75E-12
C256 37 4 0.75E-12
C257 33 4 0.75E-12
C258 33 37 60E-12
C259 38 34 60E-12
C260 37 38 60E-12
C261 0 32 3E-12
C262 32 4 0.75E-12
C263 39 32 60E-12
C264 40 39 60E-12
C265 0 39 3E-12
C266 39 4 0.75E-12
C267 0 40 3E-12
C268 40 4 0.75E-12
C269 19 40 60E-12
C270 17 11 60E-12
C271 15 41 1E-12
C272 15 16 60E-12
C273 41 16 6E-12
E3 4 0 VALUE = {500000}
R155 2 1 100E6
R156 3 2 100E6
R157 2 0 10E15
R158 3 0 10E15
R159 4 3 10E15
R160 4 2 10E15
R161 5 0 100E6
R162 7 6 100E6
R163 8 7 100E6
R164 9 8 100E6
R165 5 0 10E15
R166 7 0 10E15
R167 8 0 10E15
R168 9 0 10E15
R169 1 0 10E15
R170 4 1 10E15
R171 4 9 10E15
R172 4 8 10E15
R173 4 7 10E15
R174 4 5 10E15
R175 1 9 100E6
R176 6 5 100E6
R177 6 0 10E15
R178 4 6 10E15
R179 10 3 100E6
R180 10 0 10E15
R181 4 10 10E15
R182 12 11 100E6

R183 12 0 10E15
R184 13 0 10E15
```

R185 4 13 10E15
R186 4 12 10E15
R187 15 14 100E6
R189 17 16 100E6
R190 15 0 10E15
R191 16 0 10E15
R192 17 0 10E15
R193 11 0 10E15
R194 4 11 10E15
R195 4 17 10E15
R196 4 16 10E15
R197 4 15 10E15
R198 18 13 100E6
R199 19 18 100E6
R200 18 0 10E15
R201 19 0 10E15
R202 4 19 10E15
R203 4 18 10E15
R204 13 12 100E6
R205 21 20 100E6
R206 20 0 10E15
R207 21 0 10E15
R208 14 0 10E15
R209 4 14 10E15
R210 4 21 10E15
R211 4 20 10E15
R212 14 21 100E6
R213 20 22 100E6
R214 23 10 100E6
R215 23 0 10E15
R216 4 23 10E15
R217 25 24 100E6
R218 25 0 10E15
R219 26 0 10E15
R220 4 26 10E15
R221 4 25 10E15
R222 28 27 100E6
R223 29 28 100E6
R224 30 29 100E6
R225 28 0 10E15
R226 29 0 10E15
R227 30 0 10E15
R228 24 0 10E15
R229 4 24 10E15
R230 4 30 10E15
R231 4 29 10E15
R232 4 28 10E15
R233 24 30 100E6
R234 31 26 100E6
R235 22 31 100E6
R236 31 0 10E15

R237 22 0 10E15
R238 4 22 10E15
R239 4 31 10E15

```

R240 26 25 100E6
R241 27 0 10E15
R242 4 27 10E15
R243 27 23 100E6
R244 33 32 100E6
R245 35 34 100E6
R246 36 35 100E6
R247 4 36 100E6
R248 33 0 10E15
R249 37 0 10E15
R250 38 0 10E15
R251 34 0 10E15
R252 35 0 10E15
R253 36 0 10E15
R254 4 36 10E15
R255 4 35 10E15
R256 4 34 10E15
R257 4 38 10E15
R258 4 37 10E15
R259 4 33 10E15
R260 37 33 100E6
R261 34 38 100E6
R262 38 37 100E6
R263 32 0 10E15
R264 4 32 10E15
R265 32 39 100E6
R266 39 40 100E6
R267 39 0 10E15
R268 4 39 10E15
R269 40 0 10E15
R270 4 40 10E15
R271 40 19 100E6
R272 11 17 100E6
R273 16 41 100E6
R274 41 15 90E6
R275 16 15 100E6
X11 41 16 SPARKGAP
+PARAMS: VTHRES=300 VARC=50 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=10N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P
*
*
.SUBCKT SPARKGAP PIN1 PIN2
+PARAMS: VTHRES=90 VARC=10 ISUS=500M RNEG={-1} LPL=130N RPL=2K CPAR=1P
CARC=3P
C1 Pin1 Pin2 {CPAR}
C2 Pin1 Switch {CARC}
C3 Switchchk 0 10P
C4 13 Dif 1U
D1 6 5 DCLAMP
D2 6 Switch DCLAMP
E2 8 0 VALUE =
{IF(ABS(V(PIN1,PIN2))>V(THRESH),10,IF(ABS(I(V1))>{ISUS},10,10N))}
E3 Thresh 0 VALUE = {{VTHRES}+({VTHRES}*V(ION))}
E4 Ion 0 TABLE {V(12,0)} = (0,0) (1U,.5565M) (10M,1M) (100M,86M) (1,217M)
+ (10,521M) (100,956M)

```

```

E5 13 0 VALUE = {V(PIN1,PIN2)}
E6 14 0 VALUE = {-100MEG*V(DIF)}
E8 Dvdt 0 VALUE = {100*V(DIF)}
E9 12 0 VALUE = {ABS(V(DVDT))}
G1 Switch Pin2 VALUE = {V(SWITCH,PIN2)*V(SWITCHCHK)}
L1 2 3 {LPL}
R1 3 2 {RPL}
R2 Pin2 Pin1 10MEG
R3 5 3 {RNEG}
R4 Switch Pin2 1E10
R5 8 Switchchk 10
R6 14 Dif 1MEG
RE4 12 0 1G;added by E4
V1 Pin1 2 0
.MODEL DCLAMP D (BV={VARC})
.ENDS SPARKGAP
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u DEFW=100u
DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K DIGERRDEFAULT=20
DIGERRLIMIT=0
+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2 DIGMNTYSCALE=0.4
DIGOVRDRV=3
+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=250 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1 PIVTOL=.1p
RELTOL=1m
+ SD=2.58 SEED=0 TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80 PRIVATEANALOG
PERFORM_M=2
+ RMIN=1u R_NODE_GND=1e12 CSHUNT=0 RSHUNT=0 RP_FOR_ISOURCE=0 METHOD=TRAP
*
.LIB "C:\Program Files (x86)\mc9g\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.TRAN 0.0008 0.04 0
.PRINT TRAN (-V(0,1)) (-V(0,2)) (-V(0,3)) (-V(0,4)) (-V(0,5)) (-V(0,6))
+ (-V(0,7)) (-V(0,8)) (-V(0,9)) (-V(0,10)) (-V(0,11)) (-V(0,12)) (-
V(0,13))
+ (-V(0,14)) (-V(0,15)) (-V(0,16)) (-V(0,17)) (-V(0,18)) (-V(0,19)) (-
V(0,20))
+ (-V(0,21)) (-V(0,22)) (-V(0,23)) (-V(0,24)) (-V(0,25)) (-V(0,26)) (-
V(0,27))
+ (-V(0,28)) (-V(0,29)) (-V(0,30)) (-V(0,31)) (-V(0,32)) (-V(0,33)) (-
V(0,34))
+ (-V(0,35)) (-V(0,36)) (-V(0,37)) (-V(0,38)) (-V(0,39)) (-
V(0,40))
.PLOT TRAN (-V(0,1)) (-V(0,2)) (-V(0,3)) (-V(0,4)) (-V(0,5)) (-V(0,6)) (-
V(0,7))
+ (-V(0,8)) (-V(0,9)) (-V(0,10)) (-V(0,11)) (-V(0,12)) (-V(0,13)) (-
V(0,14))
+ (-V(0,15)) (-V(0,16)) (-V(0,17)) (-V(0,18)) (-V(0,19)) (-V(0,20)) (-
V(0,21))
+ (-V(0,22)) (-V(0,23)) (-V(0,24)) (-V(0,25)) (-V(0,26)) (-V(0,27)) (-
V(0,28))

```

```
+ (-V(0,29)) (-V(0,30)) (-V(0,31)) (-V(0,32)) (-V(0,33)) (-V(0,34)) (-  
V(0,35))  
+ (-V(0,36)) (-V(0,37)) (-V(0,38)) (-V(0,39)) (-V(0,40))  
.PRINT TRAN V(16,41)  
.PLOT TRAN V(16,41)  
*  
.END
```

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 36–41. doi: 10.15587/2312-8372.2018.123309
2. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Олексієнко В.П. Моделювання часткових розрядів при впливі грозових та комутаційних імпульсів напруги // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 589-593.
3. E. Gulski, "Digital analysis of partial discharges," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, pp. 822-837, Oct. 1995. doi: 10.1109/94.469977
4. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 594-597.
5. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Розробка фільтра верхніх частот для стенду з дослідження характеристик часткових розрядів // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 598-602.
6. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Experimental study and modeling of partial discharge detection system // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 4, No. 1 (42). P. 17–22. doi: 10.15587/2312-8372.2018.139942
7. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges // Technology

audit and production reserves. 2018. Vol. 2, No. 1 (40). P. 37–44. doi: 10.15587/2312-8372.2018.126626

8. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Михалицький В.Л. Дослідження часткових розрядів при впливі напруги змінного та постійного струму // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 586-588.

9. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky and O. Protsenko, "Partial Discharge as Threat to Insulation of High Voltage Direct Current Transmissions," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 24-27. doi: 10.1109/ESS.2019.8764201

10. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Protsenko and V. Mykhailenko, "Application of Three-Capacitance Models for Simulation of Partial Discharges in Solid Dielectric Containing Several Cavities," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 279-282. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879931

11. Anokhin Y. L. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement / Y. L. Anokhin, V. O. Brzhezitsky, Ya. O. Haran, I. M. Masliuchenko, O. P. Protsenko, Ye. O. Trotsenko // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – No. 6. – P. 53-59. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.08

12. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Protsenko, Y. Haran and V. Chumack, "Calculation of High Voltage Divider Accuracy Using Duhamel's Integral," 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Kyiv, Ukraine, 2018, pp. 213-216. doi: 10.1109/MMET.2018.8460314

13. M. Wu, H. Cao, J. Cao, H. Nguyen, J. B. Gomes and S. P. Krishnaswamy, "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, no. 6, pp. 22-35, November-December 2015. doi: 10.1109/MEI.2015.7303259

14. Троценко Є. О. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг в Micro-Cap / Є. О. Троценко, В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – № 6/1 (32). – С. 26-30.

15. Trotsenko Ye. Study of surge arrester model under influence of various current pulses / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 1/1 (33). – P. 44-48. doi: 10.15587/2312-8372.2017.92244
16. Коваль А. А. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг / А. А. Коваль, О. Р. Проценко, Є. О. Троценко // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2016. – С. 354-356.
17. Brzhezitsky V. Analysis and comparison of metal-oxide surge arrester models / V. Brzhezitsky, Ye. Trotsenko, Ya. Haran // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 6/1 (38). – P. 40-46. doi: 10.15587/2312-8372.2017.117836
18. Trotsenko Ye. Effect of piecewise linear current waveforms on surge arrester residual voltage / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 2/1 (34). – P. 25-31. doi: 10.15587/2312-8372.2017.97507
19. Trotsenko Ye. Analytical representation of switching current impulses for study of metal-oxide surge arrester models / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 5/1 (37). – P. 24-29. doi: 10.15587/2312-8372.2017.109662
20. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Філіпп Г. Д. Дослідження спрощеної моделі нелінійного обмежувача перенапруг // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2017. – С. 612-615.
21. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Яременко Д. С. Оцінка форми струмів, що протікають крізь нелінійний обмежувач перенапруг при грозових перенапругах // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2017. – С. 616-618.
22. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky and V. Mykhailenko, "Revised Effect of Inductive Voltage Drop Across Line Lead on Protective Level of Surge Arrester," 2019

IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 341-344. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879939

23. Бржезицький В. О. Дослідження причин електричного перекриття підтримуючих ізолюючих підвісок середньої фази повітряної лінії електропередачі / В. О. Бржезицький, А. А. Щерба, О. Д. Подольцев, Є. О. Троценко, С. Ю. Шевченко, Я. О. Гаран, С. Атарод // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2011. – № 6 – С. 36-41.

24. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Ісаєв В.В., Кікало В.М., Лапченко А.М., Маслюченко І.М., Троценко Є.О. Мобільна повірочна лабораторія класів напруги 0,22...110 кВ // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VI наук.-практ. конф. / Уклад.: В. М. Кікало, С. В. Білоус. – К.: АВЕГА, 2007. – С. 202-204.

25. W. D. Rust, "Utilization of a mobile laboratory for storm electricity measurements," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, Vol. 94, No. D11, pp. 13305-13311. doi: 10.1029/JD094iD11p13305

26. Бржезицький В.О., Кікало В.М., Копшин В.В., Маслюченко І.М., Смородіна Л.С., Троценко Є.О. Метод визначення похибок незаземлюваних високовольтних трансформаторів напруги // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. V наук.-практ. конф. / Уклад.: В. В. Копшин, С. В. Білоус. – К.: АВЕГА, 2005. – С. 101-105.

27. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Волощенко В.В., Кікало В.М., Маслюченко І.М., Троценко Є.О. Еталонні високовольтні трансформатори напруги тороїдального типу // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VI наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АВЕГА, 2007. – С. 96.

28. <http://www.ipes.co.uk/about-partial-discharge>

29. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібник/Бржезицький В. О. та ін. ; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків : НТУ «ХПІ». Торнадо, 2005. 930 с.

30. An Overview of State-of-the-Art Partial Discharge Analysis Techniques for Condition Monitoring Min Wu, Hong Cao, Jianneng Cao, Hai-Long Nguyen, João Bartolo Gomes, та відділ аналітики даних Shonali Priyadarsini Krishnaswamy, Інститут досліджень Infocomm, А * STAR, 1 FusionopolisШлях № 21-01 Connexis, Сінгапур 138632
31. Bailey, Ken (1994). Numerical Taxonomy and Cluster Analysis. *Typologies and Taxonomies*. с. 34. ISBN 9780803952591.
32. The Technique of Clustering Analysis of Partial Discharge.Oleg N. Agamalov
33. <https://towardsdatascience.com/k-means-clustering-algorithm-applications-evaluation-methods-and-drawbacks-aa03e644b48a>
34. <https://studfile.net/preview/3760013/page:3/>
35. Acoustic Detection of Partial Discharge IEEE Transformers Committee.
36. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals. Sacha M. Markalous. 2008.
37. Analytical GPS Navigation Solution. Alfred Kleusberg
38. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Исследование частичных разрядов при электрическом пробое модельных изоляторов из электротехнического фарфора/ Проблемы энергетики. – 2003. – №9-10. с. 134-140.
39. Вдовико В.П. Частичные раряды в диагностировании высоковольтного оборудования/ В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
40. Гатауллин А.М., Бадретдинов М.Н., Шмидт С.В., Матухин В.Л. Метод анализа параметров частичных разрядов/ Проблемы энергетики. – 2008. – №11-12. с. 105-112.
41. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018

42. M. Danikas, N. Gao, and M. Aro, "Partial discharge recognition using neural networks: A review," *Electr. Eng.*, vol. 85, pp. 87–93, 2003.
43. E. Gulski and A. Krivda, "Neural networks as a tool for recognition of partial discharges," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, pp. 984–1001, 1993.
44. R. Candela, G. Mirelli, and R. Schifani, "PD recognition by means of statistical and fractal parameters and a neural network," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, pp. 87–94, 2000.
45. A. R. G. Castro and V. Miranda, "Knowledge discovery in neural networks with application to transformer failure diagnosis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, pp. 717–724, 2005.
46. T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon, and D. Zmarzly, "Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, pp. 214–223, 2009.
47. C. Chang, J. Jin, C. Chang, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, "Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, pp. 1363–1369, 2005.